

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
 Направление подготовки **18.03.01 Химическая технология**
 Профиль **Машины и аппараты химических производств**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы			
Проектирование реактора для получения полипропилена			
УДК <u>66.023.2:678.742.3</u>			
Студент			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4Г61	Гончарук Ирина Васильевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Т.Г.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП 18.03.01 «Химическая технология» выпуска 2021 г.

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способность определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способность осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способность осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способность воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способность управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способность поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способность создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Дополнительная универсальная компетенция университета	
УК(У)-9	Способность проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность и готовность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Готовность использовать знания о современной физической картине мира, пространственно-временных закономерностях, строении вещества для понимания окружающего мира и явлений природы
ОПК(У)-3	Готовность использовать знания о строении вещества, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире
ОПК(У)-4	Владеет пониманием сущности и значения информации в развитии современного информационного общества, осознания опасности и угрозы, возникающих в этом процессе, способностью соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ОПК(У)-5	Владеет основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией
ОПК(У)-6	Владеет основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий

Код компетенции	Наименование компетенции
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность и готовность осуществлять технологический процесс в соответствии с регламентом и использовать технические средства для измерения основных параметров технологического процесса, свойств сырья и продукции
ПК(У)-2	Готовность применять аналитические и численные методы решения поставленных задач, использовать современные информационные технологии, проводить обработку информации с использованием прикладных программных средств сферы профессиональной деятельности, использовать сетевые компьютерные технологии и базы данных в своей профессиональной области, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров оборудования
ПК(У)-3	Готовность использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации продуктов и изделий, элементы экономического анализа в практической деятельности
ПК(У)-4	Способность принимать конкретные технические решения при разработке технологических процессов, выбирать технические средства и технологии с учетом экологических последствий их применения
ПК(У)-5	Способность использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда, измерять и оценивать параметры производственного микроклимата, уровня запыленности и загазованности, шума, и вибрации, освещенности рабочих мест
ПК(У)-6	Способность настраивать, настраивать и осуществлять проверку оборудования и программных средств
ПК(У)-7	Способность проверять техническое состояние, организовывать профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования, готовить оборудование к ремонту и принимать оборудование из ремонта
ПК(У)-8	Готовность к освоению и эксплуатации вновь вводимого оборудования
ПК(У)-9	Способность анализировать техническую документацию, подбирать оборудование, готовить заявки на приобретение и ремонт оборудования
ПК(У)-10	Способность проводить анализ сырья, материалов и готовой продукции, осуществлять оценку результатов анализа
ПК(У)-11	Способность выявлять и устранять отклонения от режимов работы технологического оборудования и параметров технологического процесса
ПК(У)-21	Готовность разрабатывать проекты в составе авторского коллектива
ПК(У)-22	Готовность использовать информационные технологии при разработке проектов
ПК(У)-23	Способность проектировать технологические процессы с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства в составе авторского коллектива
Дополнительная компетенция университета	
ДПК(У)-1	Способность проводить стандартные испытания материалов и изделий, проводить физические и химические эксперименты, проводить обработку и анализ результатов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
 Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
 Направление подготовки **18.03.01 Химическая технология**
 Профиль **Машины и аппараты химических производств**

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Беляев В.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

Студенту:

Группа	ФИО
З-4Г61	Гончарук Ирина Васильевна

Тема работы:

Проектирование реактора для получения полипропилена	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.01.2021 №29-63/с
Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.06.2021

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Химический реактор со встроенным теплообменником и перемешивающим устройством для синтеза полипропилена марки 21020, высший сорт (ГОСТ 26996-86).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Производительность по продукту, т/год – 6200; 2. Состав сырья: гептан-растворитель, пропилен (высший сорт), едкий натр (20%), титан трёххлористый микросферический, раствор диэтилалюминийхлорида, водород; 3. Продукт: полипропилен марки 21020, высший сорт (ГОСТ 26996-86); 4. Способ организации процесса: непрерывный; 5. Годовой фонд рабочего времени, дн – 333.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы 2. Технологическая схема установки по производству полипропилена 3. Технологические расчеты реактора

рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	4. Выбор конструкционных материалов 5. Механический расчет реактора 6. Результаты расчётов реактора 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 8. Социальная ответственность 9. Заключение 10. Список использованных источников
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Технологическая схема (А1) 2. Реактор. Вид общий (А0)
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трубченко Татьяна Григорьевна
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.04.2021
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Беляев Василий Михайлович	к.т.н., доцент		27.04.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4Г61	Гончарук Ирина Васильевна		27.04.2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из графической части и пояснительной записки, была выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 при помощи системы компьютерной алгебры MathCad, графическая часть выполнена в программе Компас 2016 и состоит из двух листов формата A1 и A0. Пояснительная записка состоит из 141 страницы, 18 таблиц, 24 рисунка и сформирована на 75 источниках литературы.

Ключевые слова: реактор с мешалкой и гладкой рубашкой, полипропилен, полимеризация, пропилен, суспензия.

Объектом разработки является реактор с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой для синтеза полипропилена методом полимеризации в суспензии.

Цель работы – выбор и расчет реактора синтеза полипропилена, который будет удовлетворять всем условиям технологического процесса. Производительность ректора по целевому продукту 6200 т/год.

Разработана технологическая схема получения полипропилена и конструкция синтеза полипропилена. Произведены конструктивный, тепловой, материальный и механический расчеты. В конструктивно-механическом расчете были произведены расчеты на прочность и устойчивость толщин стенок крышки и днища, обечайки, элементов рубашки, расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений, расчет укрепления отверстий, а также расчет вала перемешивающего устройства на прочность, жесткость и вибростойкость. Рассчитано шпоночное соединение.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» оценены экономические аспекты исследуемого подхода к построению системы автоматического регулирования температуры:

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены: правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; проведен анализ опасных и вредных факторов; определены и проанализированы факторы влияния предприятия на экологию; варианты возникновения чрезвычайной ситуации и меры предотвращения их.

Область применения: предприятия в области промышленного органического синтеза.

Экономическая значимость работы: разработанный реактор является наиболее оптимальным средством для проведения реакции полимеризации полипропилена в суспензии тяжелого растворителя (гептана).

ABSTRACT

The final qualification work consists of a graphic part and an explanatory note, was performed in the Microsoft Word 2016 text editor using the MathCad computer algebra system, the graphic part was performed in the Compass 2016 program and consists of two sheets of A1 and A0 format. The explanatory note consists of 141 pages, 18 tables, 24 figures and is formed on 75 sources of literature.

Keywords: reactor with agitator and smooth jacket, polypropylene, polymerization, propylene, suspension.

The object of the development is a reactor with a mixing device and a smooth jacket for the synthesis of polypropylene by polymerization in suspension.

The purpose of the work is to select and calculate a polypropylene synthesis reactor that will meet all the conditions of the technological process. The productivity of the reactor for the target product is 6200 tons / year.

The technological scheme for the production of polypropylene and the design of the synthesis of polypropylene have been developed. Produced constructive, thermal, material and mechanical calculations were made. In the structural and mechanical calculation, calculations were made for the strength and stability of the wall thicknesses of the lid and bottom, the shell, the jacket elements, the calculation for the strength and tightness of the flange connections, the calculation of the strengthening of the holes, as well as the calculation of the shaft of the mixing device for strength, rigidity and vibration resistance. The keyway connection is calculated.

Scope: enterprises in the field of industrial organic synthesis.

Economic significance of the work: the developed reactor is the most optimal mean for carrying out the polymerization reaction of polypropylene in a suspension of a heavy solvent (heptane).

Оглавление

Введение	10
1 Обзор литературы	12
1.1 Исходное сырьё для производства полипропилена.....	13
1.2 Способы получения полипропилена.....	13
1.3 Масштабы производства и обзор рынка полипропилена.....	14
1.4 Области применения полипропилена	15
1.5 Выбор аппаратного оформления и технологической схемы	16
2 Технологическая схема установки по производству полипропилена	18
3 Технологические расчёты реактора для синтеза полипропилена	20
3.1 Материальный баланс реактора синтеза полипропилена	20
3.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами	23
3.3 Тепловой баланс реактора для синтеза пропилена.....	27
3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза полипропилена	32
3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза полипропилена	34
3.6 Выводы по результатам технологических расчётов.....	34
4 Выбор конструкционных материалов.....	36
4.1 Расчёт основных характеристик материала	37
4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов.....	39
4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения	39
4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов	40
5 Механический расчет реактора синтеза полипропилена	41
5.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки корпуса (поз. 7) от действия внутреннего давления.....	42
5.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки от действия внутреннего давления.....	44
5.3 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки от действия внутреннего давления.....	48
5.4 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища	52
5.5 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища.....	58
5.6 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом.....	63
5.7 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой	67
5.8 Расчёт опор аппарата	77
5.9 Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора синтеза полипропилена	83
5.10 Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза полипропилена	95
5.11 Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой	99
6 Поверочный расчёт реактора синтеза полипропилена.....	102
7 Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена	103

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	108
8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований.....	108
8.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	113
8.3 Бюджет научно-технического исследования	117
8.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	120
8.4 Оценка научно-технического эффекта разработки.....	121
9 Социальная ответственность	125
9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	125
9.2 Производственная безопасность	126
9.3 Экологическая безопасность.....	130
9.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	131
Заключение	133
Список использованных источников	135

Введение

В настоящее время химическая промышленность немыслима без таких аппаратов, как реакторы. В начале появления химической технологии, как науки и понимание процессов, и объемы промышленного производства ушли далеко вперед, один из аппаратов представляет такую важность и ценность, в котором протекают химические превращения сырья в продукт – цель всякого предприятия в данной отрасли промышленности.

Наиболее распространенным видом химических реакторов, применяемых в промышленности на сегодняшний день, являются аппараты с перемешивающими устройствами. Это объясняется тем, что перемешивание реакционной массы зачастую способствует интенсификации процесса, а во многих случаях это необходимое условие для более полного его протекания, в особенности для процессов в гетерогенных системах.

Спрос на аппараты подобного рода порождает спрос и на деятельность по их проектированию, которая далеко не всегда проста и полностью подконтрольна опыту прошлых лет или нормативной документации. Каждому из химических процессов, для которого проектируется реактор, необходим особый подход, который представляет собой детальный анализ. Для правильного представления проекта в жизнь, необходимо учитывать такие факторы, как термо- и гидродинамический режимы процесса, подходящие ему конструктивные решения, разработанные в соответствии с принципами энерго- и ресурсоэффективности, наконец, методы контроля процесса и его автоматического регулирования, без которого не обходится ни одно производство.

Следовательно, в рамках данной бакалаврской работы было решено продемонстрировать, каким образом можно упростить процесс проектирования химического реактора с перемешивающим устройством при помощи автоматизации расчетно-конструкторской разработки. В качестве исходной отрасли, для которой осуществлялось бы данное проектирование, было выбрано производство полипропилена – как одного из наиболее ходовых материалов, в котором страна нуждается и силами различных компаний год от года наращивает мощности по производству данного полимера.

Основными задачами на период реализации проекта стали: детальный анализ современного состояния производства полипропилена, разбор физико-химических закономерностей процесса, выбор подходящего аппаратного оформления и технологической схемы, расчет основного аппарата (химического реактора с перемешивающим устройством) и, наконец, оценка экологической и экономической эффективности научной разработки. В качестве основных средств и методов работы над проблемой были выбраны анализ литературных источников для изучения теоретического

материала и автоматизированное проектирование на базе программы MathCAD для осуществления расчётно-конструкторской разработки.

Результатом выпускной квалификационной работы является проектирование реактора для получения полипропилена, оформленный в виде расчётно-пояснительной записки с приложениями в виде технологической схемы процесса и чертежей.

1 Обзор литературы

В рамках данного раздела бакалаврской работы дан обзор возникновения и развития промышленности по производству полипропилена, рассмотрено современное состояние этой отрасли и те технологии, которые уже используются в ней.

Полипропилен – синтетический термопластичный неполярный полимер, принадлежащий к классу полиолефинов. Представляет собой бесцветное кристаллическое вещество, выпускается, чаще всего, в форме небольших полупрозрачных гранул, но также может производиться в форме листов или нитей. Полипропилен легко окрашивается в необходимые цвета путём добавления в него различного рода пигментов и красок.

Существует несколько форм полипропилена, различающихся пространственным строением молекулы полимера [1], в общем виде пространственные формулы можно представить рисунком 1.

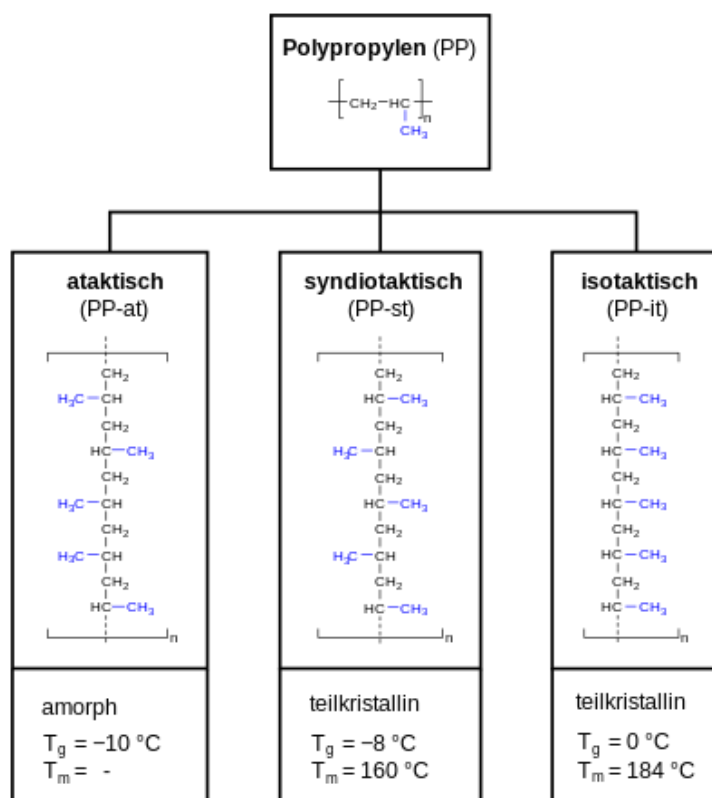


Рисунок 1 – Пространственные формы полипропилена

					ФЮРА			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Обзор литературы	Лит	Лист	Листов
Разраб.		Гончарук И.В.					12	
Руковод.		Беляев В.М.				ТПУ гр. 3-4Г61		
Консульт.								
Н. контр.								
Рук-ль ООП								

где PP-at – атактический полипропилен, PP-st – синдитактический полипропилен, PP-it – изотактический полипропилен.

Наиболее коммерчески выгодными товарными свойствами обладает изотактический полипропилен (гомополимер). Он же и является целевым продуктом производства. В то же время атактическая форма полимера считается продуктом побочным, а многими предприятиями классифицируется как отходы и утилизируется. Вследствие этого одной из задач при организации ресурсо- и энергоэффективного производства полипропилена является снижение доли атактики в конечном продукте.

Рассмотрим, каким из имеющихся на вооружении у промышленности способов этого можно достигнуть.

1.1 Исходное сырьё для производства полипропилена

Исходным сырьем для производства полипропилена является пропилен, представляющий собой бесцветный горючий газ с температурой кипения $-47,6^{\circ}\text{C}$, обладающий высокой реакционной способностью [2].

Различают следующие способы получения пропилена:

- лабораторные: дегидрогалогенирование спиртовым раствором щёлочи, гидрирование пропина на палладиевом катализаторе, дегидратация изопропилового спирта в кислой среде, дегалогенирование галогеналканов под действием цинка [3];
- промышленные: выделение при нефтепереработке из смесей газов, содержащих олефины; пиролиз этана, пропана или высших алканов, содержащихся в газах нефтепереработки или природном газе [4].

1.2 Способы получения полипропилена

В настоящее время наиболее распространены три способа синтеза полипропилена:

- газофазная полимеризация;
- полимеризация в среде лёгких растворителей;
- полимеризация в среде тяжёлых растворителей.

Полимеризация пропилена в газовой фазе осуществляется в реакторе с кипящим слоем, оборудованном двуспиральной мешалкой, обеспечивающей подъём твёрдых частиц вдоль стенки и падение вдоль оси реактора. Рабочими условиями для процесса являются диапазон температур от 160 до 250°C и давление 7 МПа [5]. Основными недостатками данного процесса являются сложности с дозированием катализатора и отводом тепла. По этой причине метод газофазной полимеризации практически не применяется непосредственно для получения полиолефинов, но является составной частью процесса по производству блоксополимеров.

					ФЮРА	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Полимеризация в среде лёгких растворителей осуществляется в химическом реакторе, оборудованном перемешивающим устройством и рубашкой. В качестве катализатора процесса используется катализаторный комплекс Циглера-Натта. В рубашку подаётся горячая вода, благодаря которой температура реакционной массы поддерживается в диапазоне от 60 до 80°C [6]. Отвод тепла производится посредством испарения пропан-пропиленовой фракции с её последующей конденсацией в холодильнике. Основными преимуществами данного способа ведения процесса являются эффективный и просто организованный отвод тепла и однородность получаемого продукта. Однако имеется и существенный недостаток, а именно – ограниченность числа марок полипропилена, которые можно произвести подобным способом.

В настоящее время наиболее распространённым способом получения полипропилена остаётся синтез в тяжёлом растворителе. При данном способе организации процесса получается наибольшее количество марок полипропилена. Основным аппаратом для данного процесса также является реактор, оборудованный механическим перемешивающим устройством, а также устройствами для отвода тепла. В качестве перемешивающих устройств используют турбинные мешалки, охлаждающими теплообменниками в данном процессе выступают рубашки либо, если это необходимо, погружные змеевики. Основными достоинствами данного способа синтеза являются высокая эффективность массообмена, термическая однородность среды, полнота диспергирования катализатора с мономером, однородность получаемого продукта. В качестве катализаторов также используются комплексы Циглера-Натта, обладающие таким достоинством, как широкое варьирование их состава, а потому – каталитической активности и стереоспецифичности их действия [7]. Таким образом получается продукт с малым содержанием более низкого по качеству атактического полипропилена. Основные недостатки – возможность образования агломератов, необходимость очистки продукта от растворителя и катализатора перед грануляцией.

1.3 Масштабы производства и обзор рынка полипропилена

Основные мощности по производству полипропилена сосредоточены в Северо-Восточной Азии, Западной Европе, Северной Америке. Совокупно на долю этих трех регионов приходится более 75% мирового производства, и потребления указанного полимера [8]. В мире полипропилен производят около 400 компаний, среди которых крупнейшими производителями являются голландская фирма LyondellBasell, китайская Sinopec Group, саудовская SABIC Group. В таблице 1 [9] приведены данные по мировому производству и потреблению полипропилена.

					ФЮРА	Лист
						14
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 1 – Динамика изменения мировых валовых мощностей и потребления полипропилена [9]

	Год				Среднегодовой прирост, %	
	1990	2008	2012	2015	1990-2008 гг.	2009-2015 гг.
Мощность, млн т/год	14,3	52,3	65	75	7,5	5,3
Потребление, млн т/год	12,5	50,3	58	67	8	4,1

Стоит отметить, что за последние десятилетия сохраняется стабильный рост объемов производства полипропилена и растет число промышленных предприятий, специализирующихся на выпуске этого материала. На сегодня полипропилен по объему производства среди термопластов занимает второе место в мире, уступая только полиэтилену.

В России в 2016 г. выпуск полипропилена составил 1 млн 380 тыс. т. Доля в мировом рынке составляет 1,4% [10]. В последние несколько лет, присутствует тенденция к активному росту производственных мощностей, идет активное расширение объемов производства, в качестве примера можно привести реализацию двух новых проектов – «Сибур-Тобольск» (500 тыс. т) и «Полиом» (210 тыс. т) [9]. Наиболее крупными производителями в России являются группа компаний ТАИФ и Сибур; производимая ими продукция включает в себя огромный ассортимент марок, на основе различных типов полипропилена. Производственные мощности российских компаний практически полностью удовлетворяют внутренний спрос и позволяют экспортировать продукцию.

1.4 Области применения полипропилена

Промышленность пластмасс выпускает богатый ассортимент продукции, на основе полипропилена с различными свойствами в зависимости от условий переработки и назначения изделия. Структура потребления полипропилена в России по отраслям отражена на рисунке 2 [8].

					ФЮРА	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Рисунок 2 – Структура потребления ПП в России по областям применения в 2015 году [8]

Обладая ценным сочетанием свойств и, что очень важно, относительно низкой стоимостью, полипропилен исключительно быстро проник во многие отрасли промышленности. Быстрому развитию производства и применения полимера в немалой степени благоприятствовало и то, что он появился на мировом рынке в период, когда уже считалось общепризнанным, что ускорение технического прогресса и расширение производства товаров широкого потребления невозможны без применения синтетических материалов.

1.5 Выбор аппаратного оформления и технологической схемы

Исходя из приведённого в пункте 1.2 настоящей работы описания различных способов синтеза полипропилена, наиболее эффективным для реализации и наиболее простым для расчёта является способ полимеризации в тяжёлом растворителе. Подробное описание технологической схемы будет дано в следующем разделе настоящей работы. В данный момент необходимо дать перечень тех аппаратов, которые потребуются для реализации выбранной технологической схемы:

- для приготовления катализаторного комплекса необходима ёмкость, снабжённая перемешивающим устройством. Наиболее удобное с точки зрения занимаемого пространства положение ёмкости – вертикальное. Необходимый объём ёмкости и её основные геометрические параметры определяются исходя из стандарта [11]. Заранее следует дать рекомендацию о предпочтительности торцевого уплотнения на данной ёмкости ввиду токсичности входящих в реакционную массу компонентов;

- полимеризация пропилена будет осуществляться в вертикальном реакторе непрерывного действия, также снабжённом механическим перемешивающим устройством с торцевым уплотнением и устройством для отвода тепла, возникающего в процессе реакции.

Таковыми устройствами могут быть теплообменная рубашка, змеевик погружного типа или

					ФЮРА	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

их комбинация – более точные рекомендации могут быть даны только после реализации теплового расчёта аппарата;

- для реализации процесса дегазации полипропилена и выделения катализатора из общей реакционной массы также должна использоваться вертикальная ёмкость, снабжённая турбинной мешалкой и теплообменной рубашкой;

- промывка полипропилена от продуктов разложения катализатора должна осуществляться деминерализованной водой в цилиндрической вертикальной ёмкости, снабжённой мешалкой с торцевым уплотнением;

- для отделения от целевого продукта – изотактического полипропилена – растворённой в гептане атактики следует использовать вертикальную центрифугу полунепрерывного класса соответствии с общей производительностью технологической нитки;

- сушка продукта должна осуществляться в две ступени для более полного удаления влаги: сначала на пневматической сушилке, затем – на двухкамерной в кипящем слое. Выбор сушилок осуществляется по производительности технологической нитки;

- для регенерации гептана и его очистки от атактического полипропилена целесообразно использовать роторно-плёночный испаритель для предотвращения забивки аппарата вследствие высокой вязкости осадка АПП.

Таким образом, в результате рассмотрения имеющихся данных в литературных источниках и оценки современного состояния промышленного синтеза полипропилена было вынесено решение о выборе технологической схемы производства в растворе гептана. Перечень необходимого оборудования для реализации технологической схемы дан выше. Основным аппаратом, подлежащим автоматизированному расчёту, принят химический реактор непрерывного действия с устройствами для отвода тепла.

В следующем разделе настоящей бакалаврской работы выбранная технологическая схема будет рассмотрена более подробно.

					ФЮРА	<i>Лист</i>
						17
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

2 Технологическая схема установки по производству полипропилена

Технологическая схема производства полипропилена отражена на рисунке 3.

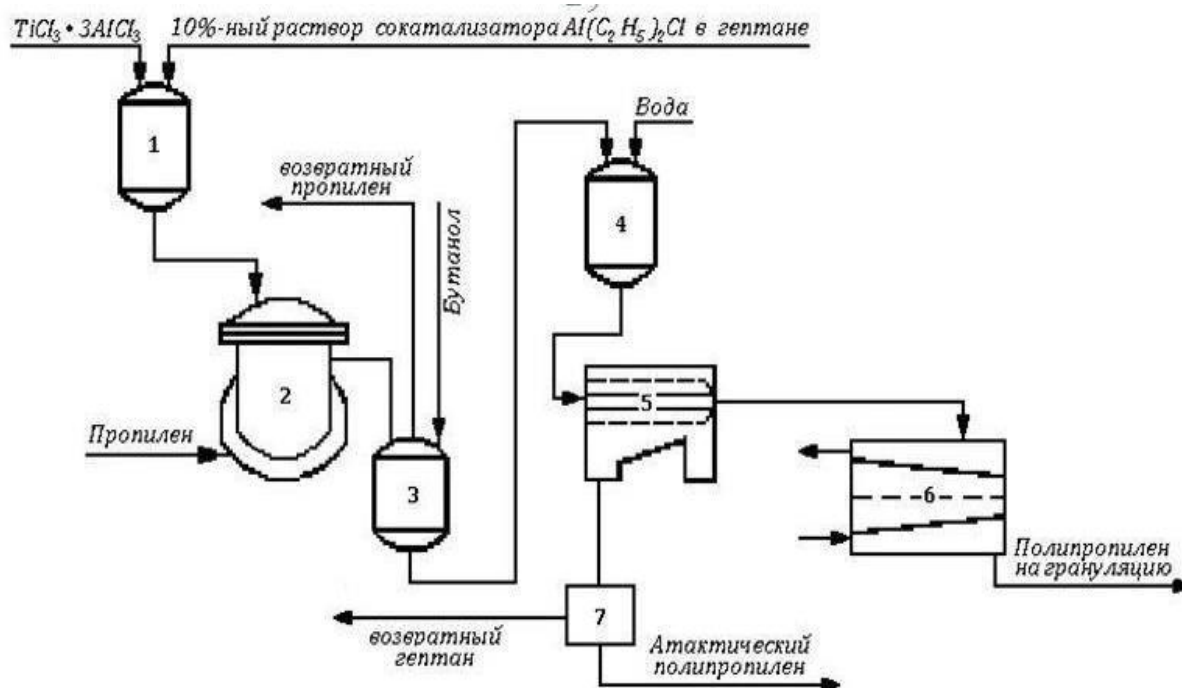


Рисунок 3 – Технологическая схема установки производства полипропилена

1 – комплекссообразователь; 2 – реактор для полимеризации; 3 – дегазатор; 4 – ёмкость для промывки продукта; 5 – центрифуга; 6 – сушилка; 7 – испаритель.

Функционирование данной технологической схемы осуществляется следующим образом:

- в ёмкости 1 готовится катализатор Циглера-Натта. Режим работы аппарата описывается следующими параметрами: рабочее давление – не более 0,07 МПа, температура каталитической суспензии – не более 30°C, уровень заполнения ёмкости – не более 80% [12];
- в реакторе 2, осуществляется процесс полимеризации подводимого в него полипропилена. Процесс осуществляется в растворе гептана в присутствии суспензии катализаторного комплекса. Режим работы: рабочее давление – 0,7 МПа, температура суспензии – 70°C, уровень заполнения реактора – 75% [12];

					ФЮРА			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Технологическая схема установки по производству полипропилена	Лит	Лист	Листов
Разраб.		Гончарук И.В.					18	
Руковод.		Беляев В.М.				ТПУ гр. 3-4Г61		
Консульт.								
Н. контр.								
Рук-ль ООП								

- из реактора 2 суспензия полипропилена поступает в дегазатор 3, где осуществляется её промывка азеотропом. Режим работы: рабочее давление – не более 0,04 МПа, температура в аппарате – от 60 до 87°C, уровень суспензии в дегазаторе – от 40 до 80% [12];
- из дегазатора 3 полипропилен поступает в промывную ёмкость 4, где очищается водой от продуктов разложения катализатора. Режим работы аппарата: рабочее давление – не более 0,03 МПа, температура – от 50 до 70°C, уровень заполнения аппарата – от 40 до 75% [12];
- для очистки от раствора атактического полипропилена в гептане суспензия поступает из промывателя 4 на центрифугу 5;
- влажный изотактический полимер поступает сначала на первую (пневматическую), а затем на вторую (в кипящем слое) ступень осушки 6. Сушка осуществляется горячим азотом; температура газа на входе в сушилку – от 105 до 135°C [12]. Из сушилки полимер отправляется на грануляцию;
- растворённый в гептане атактический полипропилен поступает в роторно-плёночный испаритель, где из него выпаривается гептан. АПП в зависимости от способа организации производства отправляется либо на установку модификации, либо на утилизацию. Регенерированный гептан возвращается в технологическую нитку. Температурный режим: от 100 до 105°C [12].

					ФЮРА	<i>Лист</i>
						19
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

3 Технологические расчёты реактора для синтеза полипропилена

В данном разделе приведён технологический расчёт основного аппарата схемы, а именно – реактора для синтеза полипропилена. Технологический расчёт состоит из следующих частей:

- материальный баланс реактора;
- гидродинамический расчёт реактора;
- тепловой расчёт реактора;
- конструктивный расчёт реактора.

В соответствии с этими целями технологического расчёта являются:

- для материального баланса – определение основных материальных потоков и объёма реактора, выбор соответствующего внутреннего диаметра;
- для гидродинамического расчёта – определение параметров гидродинамического режима аппарата в соответствии с процессом, выбор перемешивающего устройства, стойки, типа привода и мотор-редуктора;
- для теплового расчёта – определение основных тепловых потоков и требуемой поверхности теплообмена, выбор соответствующего теплообменного устройства;
- для конструктивного расчёта – выбор диаметров основных технологических штуцеров для ввода и отвода веществ.

3.1 Материальный баланс реактора синтеза полипропилена

Произведём расчёт материального баланса реактора.

3.1.1 Производительность аппарата по целевому продукту в час без учёта потерь:

$$P_{\text{БС}} = \frac{N}{D} \quad (3.1)$$

N – годовая производительность, т/год; D – число дней согласно графику планово-предупредительных ремонтов.

В соответствии с техническим заданием имеем:

$$P_{\text{БС}} = \frac{6200 \cdot 1000}{333 \cdot 24} = 775.8 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

3.1.2 В процессе работы были потери продукта и примем их равными 1,3%. Отсюда производительность, с учётом потерь, составит:

$$P_{\text{ПС}} = \frac{P_{\text{БС}}}{1 - \frac{a}{100}} = \frac{775.8}{1 - \frac{1.3}{100}} = 786 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad (3.2)$$

где a – процент потерь, %.

					ФЮРА	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На основании полученной производительности ППС и рецептуры, предложенной в пособии [12] был составлен материальный баланс для реактора полимеризации, отраженный в таблице 2.

Таблица 2 – Материальный баланс стадии полимеризации

Приход на операцию			Расход на операцию		
Состав	Массовая доля, %	Расход, кг/ч	Состав	Массовая доля, %	Расход, кг/ч
1. Пропилен в реактор в т.ч.	50,29	988,29	1. Суспензия полипропилена в т.ч.	99,90	1963,02
- пропан		1,98	Полипропилен изотактич.	40,00	785,99
- этан		0,30	Полипропилен атактич.	2,25	44,17
2. Гептан	47,91	941,42	Олигомеры	0,04	0,79
3. Катализаторный комплекс в реактор, в т.ч.		33,40	Пропилен, в т.ч.	8,01	157,24
			- пропан		1,98
			- этан		0,30
Гептан	1,59	31,24	Треххлористый титан	0,01	0,20
ДЭАХ	0,09	1,77	Гептан	49,50	971,69
Треххлористый титан	0,01	0,20	ДЭАХ	0,09	1,77
Полипропилен	0,01	0,20			
4. Водород	0,01	0,20	3. Водород	0,01	0,20
5. Азот	0,09	1,77	2. Азот	0,09	1,77
Всего :	100,00	1964,98	Всего :	100,00	1964,98

3.1.3 Объем реактора в соответствии с производительностью аппарата в час и временем пребывания реагентов в реакторе [19]:

$$V_p = u \cdot \tau \quad (3.3)$$

где u – объемная скорость, м³/ч; τ – время пребывания смеси в реакторе, ч.

3.1.4 Объемная скорость [19]:

					ФЮРА	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$u = \frac{G}{\rho_{\text{см}} \cdot \varphi} \quad (3.4)$$

где G – расход по загрузке, кг/ч; $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, кг/м³; φ – коэффициент заполнения аппарата.

3.1.5 Плотность смеси определяется по правилу аддитивности [19]:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\left[\left(\frac{x_1}{\rho_1} \right) + \left(\frac{x_2}{\rho_2} \right) + \dots + \left(\frac{x_n}{\rho_n} \right) \right]} \quad (3.5)$$

где x_i – массовые доли компонентов в смеси; ρ_i – плотность компонента смеси, кг/м³.

Массовые доли компонентов принимаем согласно материальному балансу процесса. Плотности веществ принимаем согласно справочнику [20] при температуре 25 °С:

Пропилен	$x_1 = 49.7\%$	$\rho_1 = 513$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Гептан	$x_2 = 48.5\%$	$\rho_2 = 649$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Тогда плотность смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\left(\frac{49.7\%}{513} + \frac{48.5\%}{649} \right)} = 582.712 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

3.1.6 Расход по загрузке аппарата принимаем согласно материальному балансу $G = 1965$ кг/ч, коэффициент заполнения аппарата принимаем равным $\varphi = 0,85$. Время пребывания смеси в реакторе согласно [12], составляет $\tau = 2,7$ ч. Тогда объем реактора:

$$V_P = \frac{1965 \cdot 2.7}{(582.712 \cdot 0.85)} = 10.712 \text{ м}^3$$

Согласно пособию [19] рабочий объем реактора принимается на 15 – 20% больше чем расчетный. Из технических соображений выбираем конструкцию аппарата с эллиптическим крышкой и днищем. Принимаем ближайший стандартный объем реактора согласно [21] равным 12,5 м³. Общая конструкция аппарата отражена на рисунке 4 [21].

					ФЮРА	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

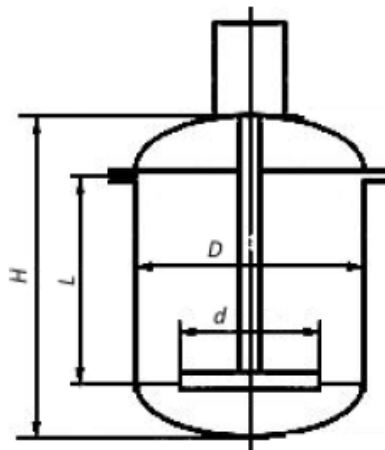


Рисунок 4 – Аппарат с мешалкой и эллиптическими крышкой и дном [21]

D – внутренний диаметр аппарата, мм; H – общая высота аппарата, мм; L – длина обечайки, мм.

В соответствии с данным стандартом принимаем D , H и L равными соответственно 1800, 5180 и 4200 мм.

3.2 Гидродинамический расчет аппарата с внутренними устройствами

Целью гидродинамического расчета является определение усредненных характеристик поля скоростей в объеме аппарата, значений осевой и радиальной сил, действующих на мешалку, глубины воронки и мощности перемешивания.

Расчет производим согласно рекомендациям пособия [19].

Согласно пособию [19], при перемешивании в аппарате суспензий при помощи быстроходных мешалок рекомендуется включить в конструкцию аппарата отражательные перегородки, конструкция которых указана на рисунке ниже. Перегородки выполняются в виде пластин шириной $0.1 \cdot D$ и устанавливаются для избегания образования слишком глубокой воронки при перемешивании. Внешний вид перегородок представлен на рисунке 5 [22].

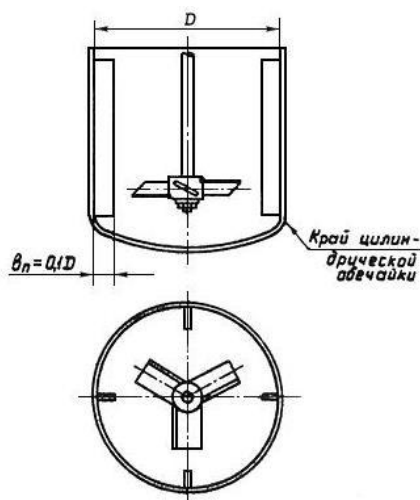


Рисунок 5 – Схема установки отражательных перегородок [22]

Параметры перегородок [22]:

					ФЮРА	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- число перегородок $Z_{оп} = 3$
- высота перегородок $h_{оп} = 1,8$ м
- ширина перегородок $b_{оп} = 0,1 \cdot D = 0,1 \cdot 1,8 = 0,18$ м

3.2.1 Отношение диаметра аппарата к диаметру мешалки [19]:

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_M} \quad (3.6)$$

где d_M – диаметр мешалки, мм.

Поскольку для реактора получения полипропилена необходима быстроходная мешалка, выбираем трехлопастную мешалку. Её внешний вид представлен на рисунке 6 [23].

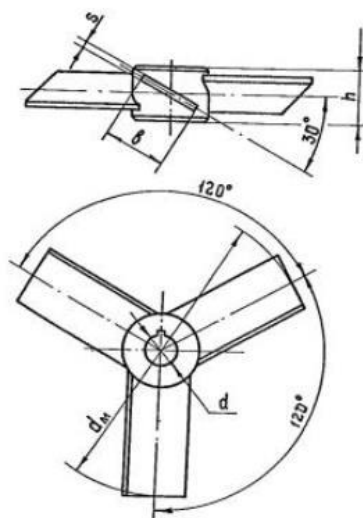


Рисунок 6 – Конструкция трёхлопастной мешалки [23]

Основные параметры мешалки [23]:

$$d_M = 0.56 \text{ м} \quad h = 0.7 \text{ м} \quad b = 0.112 \text{ м} \quad S = 0.006 \text{ м}$$

где h – ширина ступицы, м; b – ширина лопасти, м; S – толщина лопасти, м.

Тогда:

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_M} = 3.214$$

3.2.2 Центробежный критерий Рейнольдса [19]:

$$Re_{ц} = \frac{n \cdot d_M^2}{\nu} \quad (3.7)$$

где n – частота вращения мешалки, 1/с; ν – кинематическая вязкость перемешиваемой среды, m^2/c ; d_M – диаметр мешалки, мм.

					ФЮРА	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Поскольку мешалка быстроходная, примем её частоту вращения n равной 180 об/мин или 3 с^{-1} .

3.2.3 Кинематическая вязкость вычисляется по формуле [19]:

$$\nu = \left(\frac{\mu}{\rho_{\text{сус}}} \right) \quad (3.8)$$

где μ – динамическая вязкость суспензии, Па*с; $\rho_{\text{сус}}$ – плотность суспензии, кг/м³.

3.2.4 Динамическая вязкость, мПа*с [19]:

$$\mu := \mu_{\text{ж}} \cdot \left[1 + \frac{2.5}{2 \cdot (1 - 1.35 \cdot \varphi_{\text{T}})} \right] = 0.25 \cdot \left[1 + \frac{2.5}{2 \cdot (1 - 1.35 \cdot 0.35)} \right] = 0.842 \text{ мПа*с} \quad (3.9)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость гептана при 70°C, равная 0,25 мПа*с [20]; φ_{T} – объёмная доля твёрдой фазы в суспензии, равная 0,35 [12].

3.2.5 Плотность суспензии:

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{x_{1.}}{\rho_{1.}} + \frac{x_{2.}}{\rho_{2.}}} \quad (3.10)$$

где, в соответствии со справочниками [12, 20]:

$x_{1.} = 0.43$ - массовая доля полипропилена;

$x_{2.} = 0.57$ - массовая доля гептана;

$\rho_{1.} = 946$ - плотность полипропилена, кг/м³;

$\rho_{2.} = 684$ - плотность гептана, кг/м³.

Тогда:

$$\rho_{\text{сус}} = \frac{1}{\frac{0.43}{946} + \frac{0.57}{684}} = 776.47 \text{ кг/м}^3$$

3.2.6 Кинематическая вязкость, м²/с:

$$\nu = \frac{8.424 \times 10^{-4}}{776.47} = 1.085 \times 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

3.2.7 Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{3 \cdot 0.56^2}{1.085 \cdot 10^{-6}} = 8.671 \times 10^5$$

3.2.8 Параметры высоты заполнения аппарата [19]:

$$\gamma = 1 \cdot \frac{H}{D} + p \quad (3.11)$$

					ФЮРА	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где H – высота заполнения аппарата средой, м; $l = 4$ – для аппаратов с отражающими перегородками; $p = 1$ – для аппаратов со свободной поверхностью жидкости.

С учетом стандартного объема аппарата и степени его заполнения при расчетном объеме имеем:

$$\gamma = 4 \cdot \frac{3.773}{1.8} + 1 = 9.385$$

3.2.9 Осредненное значение скорости потока [19]:

$$V_{cp} = 4.35 \cdot n \cdot d_M \cdot \left(\frac{z_M \cdot \zeta_M}{\Gamma_D^2 \cdot \gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.12)$$

где ζ_M – коэффициент сопротивления трёхлопастной мешалки, равный 0,56 [19]; z_M – число мешалок на валу (конструктивно принимаем равным двум).

Отсюда:

$$V_{cp} = 4.35 \cdot 3 \cdot 0.56 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0.56}{3.214^2 \cdot 9.385} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.652 \quad \frac{м}{с}$$

3.2.10 Параметр сопротивления перегородок [19]:

$$\theta := \frac{2 \cdot \Gamma_D \cdot Z_{оп} \cdot h_{оп}}{\zeta_M \cdot D \cdot z_M} \cdot \ln \left(\frac{D}{D - 2b_{оп}} \right) = \frac{2 \cdot 3.214 \cdot 3 \cdot 1.8}{0.56 \cdot 1.8 \cdot 2} \cdot \ln \left(\frac{1.8}{1.8 - 2 \cdot 0.18} \right) = 3.842 \quad (3.13)$$

где $Z_{оп}$ – число отражающих перегородок [22]; $h_{оп}$ – высота отражающей перегородки, мм [22]; $b_{оп}$ – ширина отражающей перегородки, мм; [22].

3.2.11 Коэффициент мощности K_1 по [22] принимаем равным 0,17. Коэффициент мощности K_N по [22] принимаем равным 0,52. Тогда мощность, потребляемая мешалкой при перемешивании [19]:

$$N := K_N \cdot \rho_{сус} \cdot n^3 \cdot d_M^5 = 0.52 \cdot 776.471 \cdot 3^3 \cdot 0.56^5 = 600.388 \text{ Вт} \quad (3.14)$$

3.2.12 Необходимая мощность привода с учетом пусковых нагрузок принимается на 20% больше [19], то есть:

$$N_{\Pi} = 1.2 \cdot N = 1.2 \cdot 600.388 = 720.466 \text{ Вт}$$

По результатам расчета из ближайших нормативных значений справочника [24] выбираем привод типа I: вертикальный с концевой опорой, мотор редуктором типа ВО и электродвигателем серии АО2. Частота вращения вала $n = 180$ об/мин, угловая скорость вращения $\omega = 18,8$ с⁻¹. Номинальная мощность $N_{ном} = 1.5$ кВт.

					ФЮРА	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.3 Тепловой баланс реактора для синтеза пропилена

Целью теплового расчета аппарата является определение теплового потока Q_t через теплообменные устройства аппарата и последующее определение площади поверхности теплообмена F .

Тепловой расчет производится в соответствии с рекомендациями пособия [19].

3.3.1 Уравнение теплового баланса [19]:

$$\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{расх}} + Q_{\text{пот}} \quad (3.15)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – физическое тепло, вносимое в аппарат с материальными потоками (теплота реакции, фазовых переходов и т.д.); $Q_{\text{расх}}$ – физическое тепло, уносимое из аппарата продуктами реакции; $Q_{\text{пот}}$ – тепло теряемое в окружающую среду.

Согласно условиям процесса полимеризации, выделяющуюся теплоту в процессе реакции необходимо отводить и поддерживать температуру реакционной смеси равной 70°C. Температуру воды, поступающую в рубашку, примем равной 25°C, а температуру выходящей из рубашки воды равной 67°C [12].

3.3.2 Требуемый тепловой поток [19]:

$$Q_i = K_i \cdot F_i \cdot \Delta T_{\text{ср},i} \quad (3.16)$$

где K_i – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F_i – площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta T_{\text{ср},i}$ – средняя разность температур между перемешиваемой средой и теплоносителем, К.

3.3.3 Условие определение требуемого теплового потока [19]:

$$\Sigma Q_i \geq Q_T, \quad (3.17)$$

$$Q_T = Q_p + N + Q_M - Q_{\text{п}} \quad (3.18)$$

где Q_p – тепловой поток реакции, Вт; Q_M – тепло, вводимое в аппарат с материальными потоками, Вт; N – мощность, вводимая в аппарат перемешивающим устройством, Вт; $Q_{\text{п}}$ – потери тепла в окружающую среду, Вт.

3.3.4 Тепло вводимое в аппарат с материальным потоком, Вт [17]:

$$Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 - Q_6 \quad (3.19)$$

где Q_1 – количество тепла, приходящее с пропиленом, Вт; Q_2 – количество тепла, приходящее с гептаном, Вт; Q_3 – количество тепла, приходящее с катализаторным раствором, Вт; Q_4 – количество тепла, приходящее с газами, Вт; Q_5 – количество тепла, уносимое суспензией полипропилена, Вт; Q_6 – количество тепла, уносимое газами, Вт.

3.3.5 Расчет количества тепла i -го потока [19]:

					ФЮРА	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_i = \frac{G_i \cdot C_{p,i} \cdot T_i}{3.6} \quad (3.20)$$

где G_i – массовый расход i -го потока, кг/ч; $C_{p,i}$ – теплоемкость i -той смеси, кДж/(кг*К); T_i – температура потока, К.

3.3.6 Теплоемкости веществ определяем при помощи справочника [20]. В случае если поток состоит из нескольких веществ, теплоемкость определяется по правилу аддитивности, по следующей формуле:

$$C_{p,i} = x_1 \cdot C_{p,1} + x_2 \cdot C_{p,2} + \dots + x_n \cdot C_{p,n} \quad (3.21)$$

где $x_{1,2,n}$ – массовая доля вещества в смеси; $C_{p,1,2,n}$ – теплоемкость вещества при температуре процесса, кДж/(кг*К).

Произведем расчет тепловых потоков, согласно их массовым расходам в материальном балансе:

- приход тепла с потоком пропилена:

$$Q_1 := \frac{G_1 \cdot C_{p1} \cdot T_1}{3.6} = \frac{988.29 \cdot 1.62 \cdot (70 + 273)}{3.6} = 1.525 \times 10^5 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком гептана:

$$Q_2 := \frac{G_2 \cdot C_{p2} \cdot T_2}{3.6} = \frac{941.42 \cdot 2.52 \cdot 343}{3.6} = 2.26 \times 10^5 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком катализатора:

$$C_{p3} = x_{TiCl} \cdot C_{p,TiCl} + x_{ДЭАХ} \cdot C_{p,ДЭАХ} + x_{теп} \cdot C_{p,теп}$$

$$C_{p3} = 0.005 \cdot 1.3 + 0.05 \cdot 2.5 + 0.935 \cdot 2.52 = 2.49$$

$$Q_3 := \frac{G_3 \cdot C_{p3} \cdot T_3}{3.6} = \frac{33.4 \cdot 2.488 \cdot 343}{3.6} = 7.917 \times 10^3 \text{ Вт}$$

- приход тепла с потоком газов незначителен, примем его как 0,05% от всех входящих потоков тепла:

$$Q_4 := 0.0005 \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) = 5 \times 10^{-4} \cdot (1.525 \times 10^5 + 2.26 \times 10^5 + 7.917 \times 10^3) = 193.25 \text{ Вт}$$

- унос тепла с суспензией полипропилена:

					ФЮРА	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$C_{p5} := x_{\text{теп}} \cdot C_{p.\text{теп}} + x_{\text{пп}} \cdot C_{p.\text{пп}} + x_{\text{п}} \cdot C_{p1} = 0.495 \cdot 2.52 + 0.425 \cdot 2.9 + 0.08 \cdot 1.62 = 2.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_5 := \frac{G_5 \cdot C_{p5} \cdot T_5}{3.6} = \frac{1.963 \times 10^3 \cdot 2.609 \cdot 343}{3.6} = 4.881 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.7 Так как газы не участвуют в реакции, то они выходят в том же объеме и при той же температуре, что и входят, соответственно можем принять теплоту, уносимую газами равной Q_4 :

$$Q_6 = Q_4 = 193.247 \text{ Вт}$$

Тогда тепло, вводимое в аппарат с материальным потоком:

$$Q_M = 1.525 \times 10^5 + 2.26 \times 10^5 + 7.917 \times 10^3 + 193.247 - 4.881 \times 10^5 - 193.247 = -1.016 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.8 Реакция полимеризации полипропилена экзотермическая. Количество выделяющегося тепла [19]:

$$Q_p = \frac{G_1 \cdot \Delta H \cdot X_a}{3.6} \quad (3.22)$$

где $\Delta H = 1386 \text{ кДж/кг}$ – изменение энтальпии реакции полимеризации [20]; $X_a = 0.84$ – степень конверсии полипропилена [12].

Тогда:

$$Q_p = \frac{988.29 \cdot 1.386 \times 10^3 \cdot 0.84}{3.6} = 3.196 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.9 Мощность привода мешалки определена в предыдущем разделе и равна $N = 1.5 \text{ кВт} = 1500 \text{ Вт}$. Количество потерь теплоты обычно принимается равным 3-5% от общего количества теплоты [19]:

$$Q_{\text{пот}} := 0.03 \cdot (Q_M + N + Q_p) = 0.03 \cdot (-1.016 \times 10^5 + 1.5 \times 10^3 + 3.196 \times 10^5) = 6.586 \times 10^3 \text{ Вт}$$

Тогда значение теплового потока составит:

$$Q_T = -1.016 \times 10^5 + 1.5 \times 10^3 + 3.196 \times 10^5 - 6.586 \times 10^3 = 2.13 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.10 Коэффициент теплопередачи [19]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \Sigma \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_T}} \quad (3.23)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи от перемешиваемой среды к стенке теплообменного устройства, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; α_T – коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменного устройства

					ФЮРА	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

охлаждающему агенту, Вт/(м²*К); $\Sigma(\delta/\lambda)$ – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений, рассчитываемая по формуле:

$$\Sigma \cdot \left(\frac{\delta}{\lambda} \right) = \frac{s}{\lambda} + \frac{s'}{\lambda'} \quad (3.24)$$

где s – толщина теплопередающей стенки, принимаемая равной 0,008 м по механическому расчёту; s' – толщина образовавшегося слоя накипи, принимаемая конструктивно равной 0,002 м [25]; λ – коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н10Т, равный 16 Вт/(м*К) [26]; λ' – коэффициент теплопроводности накипи, принимаемый равным 2 Вт/(м*К) [25].

3.3.11 Коэффициент теплоотдачи от реакционной массы к стенке аппарата при использовании быстрходных мешалок [19]:

$$\alpha_c = a_2 \cdot N^{0.29} \cdot D^{(-0.71)} + a_3 \cdot N^{0.18} \cdot D^{0.82} \quad (3.25)$$

где D – внутренний диаметр аппарата, м; N – мощность привода мешалки, Вт;

a_2 и a_3 – вспомогательные коэффициенты которые рассчитываются по следующим формулам [19]:

$$a_2 = 0.0237 \cdot a_1 \cdot \rho^{0.58} \cdot \mu^{(-0.54)} \quad (3.26)$$

$$a_3 = 0.93 \cdot a_1 \cdot \rho^{0.36} \cdot \mu^{-0.24} \quad (3.27)$$

где $\rho = 776.5$ кг/м³ – плотность реакционной среды; $\mu = 0.842$ мПа*с – динамическая вязкость среды (рассчитаны в предыдущих пунктах)

Тогда:

$$a_2 = 0.024 \cdot 0.352 \cdot 776.471^{0.58} \cdot (8.424 \times 10^{-4})^{-0.54} = 18.104$$

$$a_3 = 0.93 \cdot 0.352 \cdot 776.471^{0.36} \cdot (8.424 \times 10^{-4})^{-0.24} = 19.649$$

$$\alpha_c = 18.104 \cdot (1.5 \times 10^3)^{0.29} \cdot 1.8^{-0.71} + 19.649 \cdot (1.5 \times 10^3)^{0.18} \cdot 1.8^{0.82} = 218.124 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.12 Коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменного устройства к жидкости, находящейся в нём [19]:

$$\alpha_T = C_s \cdot \lambda_T \cdot (GrPr)^f \cdot H_p^{-1} \quad (3.28)$$

где C_s и f – вспомогательные коэффициенты определяем по таблице из пособия [19] в зависимости от произведения $Pr \cdot Gr$; $Gr \cdot Pr$ – произведение критериев Грасгофа и Прандтля; $\lambda_T = 0.668$ Вт/(м*К) – коэффициент теплопроводности воды [20]; H_p – высота цилиндрической части рубашки [21].

					ФЮРА	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.3.13 Средняя температура теплоносителя вычисляется как среднее значение между начальной и конечной температурой воды [19]:

$$T_{cp} := 0.5 \cdot (T_H + T_K) = 0.5 \cdot (298 + 340) = 319 \text{ К} \quad (3.29)$$

3.3.14 Температура стенки вычисляется как средняя между средней температурой теплоносителя и температурой среды в аппарате по аналогии с формулой (3.29):

$$T_{ст} := 0.5 \cdot (T + T_{cp}) = 0.5 \cdot (343 + 319) = 331 \text{ К}$$

3.3.15 Вспомогательный параметр Δ для воды [19]:

$$\Delta = 3.835 \cdot 10^9 + 0.4283 \cdot 10^9 \cdot T_{cp} + 1.004 \cdot 10^7 \cdot T_{cp}^2 = 1.162 \times 10^{12} \quad (3.30)$$

3.3.16 Произведение критериев Грасгофа и Прандтля [19]:

$$Gr \cdot Pr = H_p^3 \cdot (T_{ст} - T_{cp}) \cdot \Delta \quad (3.31)$$

где $H_p = 4.05 \text{ м}$ – высота цилиндрической части рубашки [21].

Отсюда:

$$Gr \cdot Pr = 4.05^3 \cdot (331 - 319) \cdot 1.162 \times 10^{12} = 9.264 \times 10^{14}$$

3.3.17 Согласно [19] принимаем значения $C_s = 0.135$ и $f = 0.33$. Тогда, коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке аппарата будет равен:

$$\alpha_T = 0.135 \cdot 0.668 \cdot (9.264 \times 10^{14})^{0.33} \cdot 4.05^{-1} = 1.935 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.18 Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{218} + \frac{1}{1.935 \cdot 10^3} + \frac{8 \times 10^{-3}}{16} + \frac{2 \times 10^{-3}}{2}} = 151.424 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.19 Средний температурный напор [19]:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln(\Delta T_B / \Delta T_M)}, \quad (3.32)$$

где ΔT_B и ΔT_M – соответственно, большая и меньшая разности температур теплоносителя и перемешиваемой среды на входе и выходе.

В соответствии с уже принятыми значениями температур теплоносителей [19]:

$$\Delta T_B = (70 - 25) + 273 = 318 \text{ К}$$

$$\Delta T_M = (70 - 67) + 273 = 276 \text{ К}$$

Тогда:

					ФЮРА	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta T_{cp} = \frac{318 - 276}{\ln\left(\frac{318}{276}\right)} = 296.5 \text{ К}$$

3.3.20 Площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\text{т}} := \frac{Q_{\text{т}}}{K \cdot \Delta T_{cp}} = \frac{2.13 \times 10^5}{151.424 \cdot 296.5} = 21.53 \text{ м}^2$$

3.3.21 В соответствии с конструкцией аппарата по стандарту [21] примем в качестве теплообменного устройства гладкую теплообменную рубашку конструкции: внутренний диаметр $D_{руб} = 1950$ мм, толщина стенки $s_{руб} = 8$ мм (из механического расчёта); высота цилиндрической части $H_{руб} = 3770$ мм.

Поверхность теплообмена рубашки [19]:

$$F_{руб} = \pi \cdot (D_{руб} + 2 \cdot s_{руб}) \cdot H_{руб} \quad (3.33)$$

То есть:

$$F_{руб} = \frac{\pi \cdot (1950 + 2 \cdot 8) \cdot 3770}{10^6} = 23.285 \text{ м}^2$$

Таким образом, поскольку поверхность теплообмена у рубашки больше, чем расчётная, позволительно в данном проекте использовать её в качестве теплообменного устройства.

3.3.21 Расход воды в рубашку для охлаждения аппарата [19]:

$$G_{\text{в}} := \frac{(Q_{\text{т}})}{C_{\text{р.в}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})} = \frac{2.13 \times 10^5}{4.18 \times 10^3 \cdot (340 - 298)} = 1.213 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (3.34)$$

где $C_{\text{р.в}}$ – теплоёмкость воды при средней температуре теплоносителя, кДж/(кг*К) [20]

3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза полипропилена

Расчётный диаметр технологического штуцера [27]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}} \quad (3.35)$$

где G – массовый расход потока, кг/с; ω – скорость потока, м/с; ρ – плотность поступающего вещества, кг/м³.

Массовые расходы веществ определены в рамках материального баланса аппарата. Скорости потоков в соответствии с рекомендациями [27] принимаются в интервале от 0,5 и

					ФЮРА	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

до 2 м/с для жидкостей и от 10 до 30 м/с для газообразных веществ. Плотности веществ в потоках принимаются по данным справочника [20]. Размеры стандартных штуцеров примем в соответствии с документом [28]. Для удобства систематизируем данные в таблице 3.

Таблица 3 – Расчёт диаметров технологических штуцеров

Обозначение	Назначение	G, кг/с	w, м/с	ρ , кг/м ³	d, м	D _y , мм [28]	s, мм [28]	l, мм [28]
А	Ввод полипропилена в реактор	0,275	0,5	513	0,04	40	3	215
Б	Ввод гептана в реактор	0,262	0,5	649	0,03	32	3	215
В	Ввод катализаторного комплекса в реактор	0,0093	0,5	650	0,01	20	3	215
Г	Ввод воды в рубашку	1,213	0,5	1000	0,05	50	3	215
Д	Отвод воды из рубашки	1,213	0,5	1000	0,05	50	3	215
Е	Отвод суспензии полипропилена из реактора	0,546	0,5	780	0,04	40	3	215
Ж	Установка датчика давления					25	3	215
З	Установка датчика температуры					25	3	215
Л	Люк-лаз					500	12	270

где D_y – условный проход штуцера, мм; s – толщина стенки штуцера, мм; l – длина штуцера, мм. Все три величины приняты в соответствии с документом [28].

Таким образом, для реактора синтеза полипропилена были выбраны необходимые технологические штуцера. Дополнительные рекомендации по необходимости и методам укрепления отверстий для этих штуцеров будут даны в рамках механического расчёта.

					ФЮРА	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза полипропилена

В соответствии с пособием [27] толщину тепловой изоляции находят по равенству удельных тепловых потоков через слой изоляции от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_B \cdot (t_{CT2} - t_B) = \frac{\lambda_{И}}{\delta_{И}} \cdot (t_{CT1} - t_{CT2}) \quad (3.36)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м²·К) [24]:

$$\alpha_B = 9.3 + 0.058 \cdot t_{CT2} \quad (3.37)$$

t_{CT2} – температура изоляции со стороны окружающей среды (воздуха), принимаемая для аппаратов, расположенных в закрытом помещении в интервале от 35 до 45°C; t_{CT1} – температура изоляции со стороны аппарата, принимаемая равной средней температуре среды в аппарате, °C; t_B – температура окружающей среды (воздуха), °C; $\lambda_{И}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м·К).

Выберем в качестве материала для теплоизоляции совелит (85% магнезии + 15% асбеста), имеющий коэффициент теплопроводности 0,098 Вт/(м·К). Тогда, приняв t_{CT2} равной 40, t_{CT1} – 70, а t_B – 30 °C, получим:

$$\alpha_B = 9.3 + 0.058 \cdot 40 = 11.62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$
$$\delta_{И} = \frac{0.098 \cdot (70 - 40)}{[11.62 \cdot (40 - 30)]} = 0.025 \text{ м}$$

Таким образом, принимаем толщину совелитовой изоляции равной 25мм.

3.6 Выводы по результатам технологических расчётов

В рамках технологического расчёта были приняты следующие конструктивные решения:

- по материальному балансу – выбран реактор объёмом 12,5 м³, внутренним диаметром 1800 мм, высотой 5180 мм и длиной цилиндрической обечайки 4200 мм;
- по гидравлическому расчёту – была выбрана быстроходная трёхлопастная мешалка с диаметром 560 мм, частотой вращения 180 об/мин. Для этой мешалки был подобран вертикальный привод типа I с концевой опорой, мотор-редуктор типа ВО и электродвигатель серии АО2. Номинальная мощность привода равна 1,5 кВт;
- по тепловому расчёту – выбрана гладкая теплообменная рубашка с внутренним диаметром 1950 мм, толщиной стенки 8 мм, высотой цилиндрической части 3770 мм и поверхностью теплообмена 23,285 м²;

					ФЮРА	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- по конструктивному расчёту – выбраны стандартные технологические штуцера для всех потоков, входящих в аппарат и выходящих из него, датчиков давления и температуры, а также определён штуцер под люк-лаз.
- по расчёту тепловой изоляции – принято решение установить реактор в помещении ввиду его малых габаритов; для реактора принята соевитовая изоляция слоем толщиной 25 мм.

					ФЮРА	<i>Лист</i>
						35
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

4 Выбор конструкционных материалов

Основными требованиями, которым должны отвечать химические аппараты, являются механическая надежность, долговечность, конструктивное совершенство, простота изготовления, удобство транспортирования, монтажа и эксплуатации. В соответствии с источником [29] к конструкционным материалам проектируемой аппаратуры предъявляются следующие требования:

- материалы должны быть стойки по отношению к коррозии в агрессивных средах при рабочих параметрах процесса;
- им необходима высокая прочность при заданных рабочих давлениях, температуре и дополнительных нагрузках, возникающих при прочностных испытаниях и эксплуатации аппаратов;
- материалы должны легко поддаваться сварке, а их сварные соединения – иметь высокую механическую прочность;
- материалы должны быть недороги и доступны.
- Кроме того, при выборе конструкционных материалов необходимо учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное расширение и т. д.).
- Для проведения конструктивно-механического расчёта аппарата необходимо определить материалы следующих его частей:
 - детали, подверженные коррозионному воздействию реакционной среды, находящейся в аппарате (корпус, днище, фланец, крышка, соответствующие штуцеры, мешалка, вал и его уплотнение);
 - детали, подверженные коррозионному воздействию охлаждающей воды (рубашка, отдельные части корпуса и днища, соответствующие штуцеры);
 - крепёжные элементы, не контактирующие с реакционной средой или охлаждающей водой (болты, гайки, шайбы);
 - прокладки (в частности, прокладка во фланце).
- В результате анализа различных литературных источников, рекомендаций и стандартов можно прийти к следующим выводам:
 - для элементов, контактирующих с реакционной массой принять в соответствии

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Выбор конструкционных материалов</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>						
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					36	
<i>Консульт.</i>						ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

- с рекомендациями [24, 29, 30] назначить сталь 12X18H10T в качестве конструкционного материала. Данная сталь является достаточно надёжной для работы в агрессивных средах с высокой коррозионной активностью;
- для теплообменной рубашки, контактирующей только с водой, по рекомендации [24, 29] позволительно использовать сталь 15ХМ, поскольку температурный диапазон её применимости соответствует условиям протекания технологического процесса;
- для крепёжных деталей (болтов, гаек, шайб) в соответствии с пособием [24, 29] позволительно использовать сталь 20, поскольку она рекомендована для данных изделий, а температурный диапазон её применимости также соответствует технологическому режиму. Крепёжные элементы не контактируют с коррозионными и агрессивными средами, что также является аргументом в пользу использования данной стали;
- для изготовления прокладок по рекомендации [24] предлагается использовать фторопласт-4 как материал, устойчивый в средах средней и высокой агрессивности, а также соответствующий температурному режиму протекания процесса в реакторе.
- Для дальнейшего расчёта аппарата необходимо определить основные показатели его конструкционных материалов. Схема расчёта продемонстрирована на примере стали 12X18H10T, показатели по остальным материалам будут приведены в конце раздела.

4.1 Расчёт основных характеристик материала

Средами, воздействующими на стенку цилиндрической обечайки корпуса аппарата, являются охлаждающая вода и суспензия полипропилена в гептане с температурами 67 и 70°C соответственно. Расчётная температура определяется из условия [31]:

$$t_p := \max(t_n, 20) \quad (4.1)$$

где t_p – расчётная температура, °C; t_n – рабочая температура, °C [31].

В соответствии с данным условием примем значение рабочей температуры стенки цилиндрической обечайки равным 70°C, поскольку максимальная температура охлаждающей воды в рубашке близка к температуре в реакторе.

4.1.1 Допускаемое напряжение для аустенитных хромоникелевых сталей [31]:

$$\sigma_d = \eta \cdot \min \left(\frac{R_{p0.2t}}{n_T}, \frac{R_{m,t}}{n_B} \right) \quad (4.2)$$

где σ_d – допускаемое напряжение, МПа; η – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям; $R_{p0.2t}$ – минимальное значение условного предела текучести при остаточном удлинении 0,2% при расчётной температуре, МПа; $R_{m,t}$ – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчётной температуре, МПа; n_T – коэффициент

					ФЮРА	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

запаса прочности по пределу текучести; n_b – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению [31].

Поправочный коэффициент η принимается равным 1, поскольку обечайка изготавливается из листового проката, а не из отливки. Коэффициенты запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению n_t и n_b в соответствии с [31] принимаются равными 1,5 и 3. Предел текучести и временное сопротивление $R_{p0,2/t}$ и $R_{m/t}$ принимаются по таблицам Б.8 и Б.9 методом линейной интерполяции:

$$R_{p.02.70} = \text{Floor} \left[\text{interp} \left[\left(\begin{array}{c} 20 \\ 100 \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} 240 \\ 228 \end{array} \right), 70 \right], 0.5 \right] = 232.5 \text{ МПа}$$

$$R_{m.70} = \text{Floor} \left[\text{interp} \left[\left(\begin{array}{c} 20 \\ 100 \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} 540 \\ 500 \end{array} \right), 70 \right], 0.5 \right] = 515 \text{ МПа}$$

В расчётах мы пренебрегли множителем $R_{p.02.20}/240$, поскольку предел текучести для данной стали при 20°C также равен 240 МПа, а потому предлагаемый в стандарте [31] множитель будет равен единице.

Тогда по формуле (4.2):

$$\sigma_d = 1 \cdot \min \left(\frac{232.5}{1.5}, \frac{515}{3} \right) = 155 \text{ МПа}$$

Принимаем σ_d равным 155 МПа.

Для условий гидравлических испытаний коэффициент запаса прочности n_t принимается равным 1,1. Значение предела текучести берётся из той же таблицы Б.8 но, в соответствии со стандартом [31], при 20°C, так как именно при такой температуре проводятся испытания.

Допускаемое напряжение при гидравлическом испытании [31]:

$$\sigma_{d.20} = \eta \cdot \frac{R_{p.02.20}}{n_t} \quad (4.4)$$

Тогда:

$$\sigma_{d.20} = 1 \cdot \left(\frac{240}{1.1} \right) = 218 \text{ МПа}$$

4.1.2 Модуль продольной упругости определяется по таблице В.1 стандарта [31] по формуле линейной интерполяции, сходной с (4.2). Значения модуля на границах температурного диапазона берутся из таблицы. Таким образом, для рабочих условий и для условий испытаний модуль продольной упругости стали 12Х18Н10Т принимается равным $2 \cdot 10^5$ МПа, поскольку в границах температурного диапазона от 20 до 100°C значения модуля упругости одинаковы, а потому нет необходимости в линейной интерполяции.

					ФЮРА	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4.1.3 Коэффициент линейного расширения α определяется по таблице Г.1 стандарта [31] и принимается для выбранной стали равным $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Так как данный коэффициент указывается для температурного диапазона от 20 до 100°C , позволительно использовать его как для рабочих условий, так и для условий гидравлических испытаний.

4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов

Основные характеристики конструкционных материалов, полученные в соответствии с [26, 31, 32], а также методом линейной интерполяции на основе этих источников, приведены в сводной таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики выбранных конструкционных материалов

Марка стали	t, $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{д}}$, МПа	E, МПа	α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
12X18H10T	20	218	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	67,2	178	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	70	155	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
15XM	20	155	$2,10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
	70	153,5	$2,06 \cdot 10^5$	$11,9 \cdot 10^{-6}$
20	20	147	$1,99 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$
	59,5	143	$1,91 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$

Отдельно зафиксируем следующие данные по фторопласту-4 в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики выбранных неметаллических конструкционных материалов

Материал	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	E _{ср} , МПа	α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
фторопласт-4	11,8	686	$25 \cdot 10^{-5}$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – разрушающее напряжение, МПа, E_{ср} – модуль упругости на сжатие, МПа.

4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения

В соответствии с пособием [24] прибавка к толщине обечайки, крышки днища и т.д. рассчитывается как сумма прибавок на различные виды разрушений. Выделим в формуле три основных слагаемых:

$$c = c_{\text{к}} + c_{\text{э}} + c_{\text{д}} \quad (4.5)$$

где $c_{\text{к}}$ – прибавка к толщине стенки на коррозию, мм; $c_{\text{э}}$ – прибавка к толщине стенки на эрозию, мм; $c_{\text{д}}$ – прибавка к толщине стенки на другие виды разрушений, мм [24].

Прибавка к толщине стенки на коррозию рассчитывается по формуле:

$$c_{\text{к}} = \Pi \cdot T_{\text{э}} \quad (4.6)$$

где Π – глубинный показатель коррозии стали, мм/год; $T_{\text{э}}$ – срок эксплуатации аппарата, год.

					ФЮРА	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Значительным коррозионным разрушениям подвержены детали, изготовленные из сталей 12X18H10T и 15XM ввиду контакта с реакционной массой и охлаждающей водой. Показатели глубинной коррозии этих сталей Π равными 0,1 мм/год [24]. По пособию [24] принимаем срок эксплуатации $T_{\text{э}}$ равным 20 годам. Таким образом, для сталей:

$$c_{\text{к}} = 0.1 \cdot 20 = 2 \text{ мм}$$

По рекомендации пособия [24] пренебрежём прибавками к толщине на эрозию и дополнительные виды разрушений и примем общие прибавки для рубашки и обечайки равными 2 мм.

4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов

В соответствии с рекомендациями литературных источников в рамках данного раздела были произведены следующие решения:

- принять сталь 12X18H10T в качестве материала для изготовления корпуса, концевых элементов, фланцевого соединения, штуцеров и перемешивающего устройства аппарата;
- принять сталь 15XM в качестве материала для изготовления теплообменной рубашки;
- принять сталь 20 в качестве материала для изготовления крепёжных элементов фланцевых соединений;
- принять фторопласт-4 в качестве материала для прокладки во фланцевом соединении;
- принять единую для сталей прибавку на различные виды разрушений, равную 2 мм.

Характеристики материалов, необходимые для проведения механического расчёта, приведены в таблицах 4 и 5, к которым можно будет обращаться впоследствии.

					ФЮРА	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5 Механический расчет реактора синтеза полипропилена

Целью механического расчёта химического реактора является определение конструктивных размеров различных элементов аппарата и их проверка по критериям прочности и надёжности как в рабочих условиях, так и в условиях испытаний. Данные критерии разнятся от элемента к элементу, а потому будут предварительно оговариваться в каждом подпункте настоящего раздела.

Расчетная схема аппарата представлена на рисунке А.1

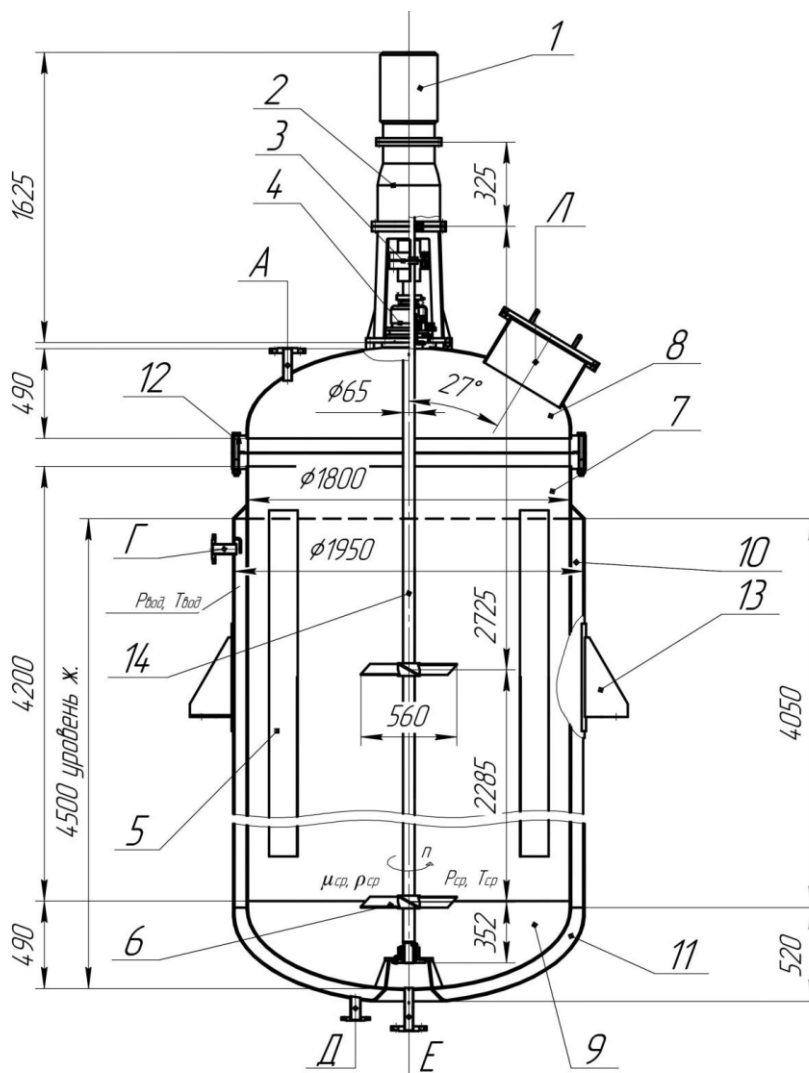


Рисунок А.1 – Расчётная модель реактора для синтеза полипропилена, главный вид

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>			<i>Механический расчет реактора синтеза полипропилена</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					41	
<i>Консульт.</i>						ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

1 – мотор редуктор типа ВО; 2 – стойка привода типа I с концевой опорой; 3 – муфта втулочно-пальцевая; 4 – уплотнение торцевое; 5 – отражательная перегородка; 6 – мешалка трёхлопастная; 7 – цилиндрическая обечайка корпуса, 8 – эллиптическая крышка корпуса, 9 – эллиптическое днище корпуса, 10 – цилиндрическая обечайка рубашки, 11 – эллиптическое днище рубашки, 12 – фланец типа шип-паз, 13 – опорная лапа; 14 – вал однопролётный; А – штуцер для ввода полипропилена в реактор, Б – штуцер для ввода гептана в реактор, В – штуцер для ввода катализаторного комплекса в реактор, Г – штуцер для ввода воды в рубашку аппарата, Д –штуцер для отвода воды из рубашки аппарата, Е – штуцер для отвода суспензии полипропилена из реактора, Ж – штуцер для установки датчика давления, З –штуцер для установки датчика температуры; Л – люк-лаз.

5.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки корпуса (поз. 7) от действия внутреннего давления

Расчётная схема цилиндрической обечайки представлена на рисунке 7.

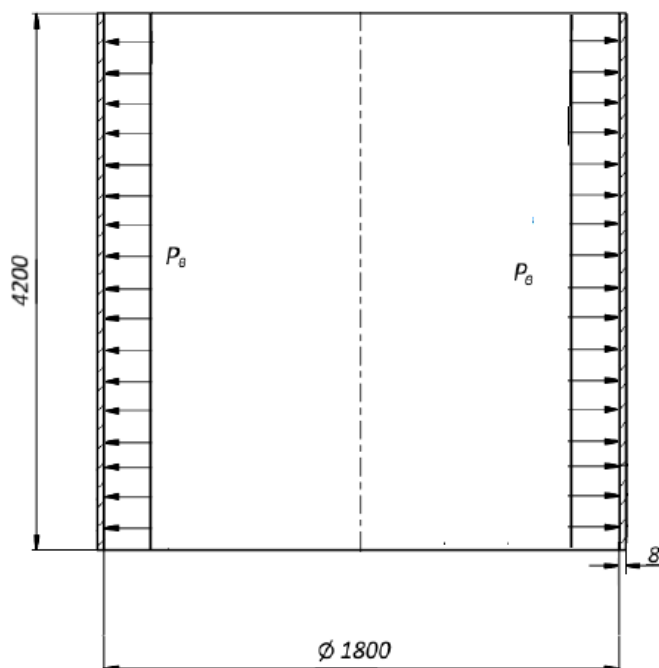


Рисунок 7 – Расчётная схема цилиндрической обечайки

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр обечайки, мм, $D = 1800$;
- внутреннее рабочее давление, МПа, $p_{\text{раб}} = 0,7$;
- плотность смеси в реакторе, кг/м³, $\rho = 776,5$;
- высота заполнения реактора, м, $h_{\text{зап}} = 3,78$;
- допускаемое напряжение стали 12X18Н10Т для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);

					ФЮРА	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для условий гидравлических испытаний, МПа $\sigma_{д.20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки цилиндрической обечайки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции.

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д.и.} \quad (5.2)$$

где $p_{и}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;
 $p_{д.и.}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

5.1.1 Расчётное давление при рабочих условиях:

$$p = p_{раб} + \frac{\rho \cdot g \cdot h_{зап}}{10^6} \quad (5.3)$$

где ρ – плотность смеси в реакторе, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{зап}$ – высота заполнения реактора, м [31].

Тогда:

$$p = 0,7 + \frac{776,5 \cdot 9,81 \cdot 3,78}{10^6} = 0,729 \text{ МПа}$$

5.1.2 Пробное давление для гидравлических испытаний аппарата:

$$p_{и} = 1,25 \cdot p \cdot \frac{\sigma_{д.20}}{\sigma_{д}} \quad (5.4)$$

где p – расчетное давление при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д}$ – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.20}$ – допускаемое напряжение материала аппарата при условиях гидравлического испытания, МПа [31].

Тогда:

$$p_{и} = 1,25 \cdot 0,729 \cdot \frac{218}{155} = 1,282 \text{ МПа}$$

5.1.3 Расчётная толщина цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_p = \max \left(\frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_{д} \cdot \phi - p}, \frac{p_{и} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{д.20} \cdot \phi - p_{и}} \right) \quad (5.5)$$

где D – внутренний диаметр аппарата, мм; p – расчётное давление, МПа; $p_{и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $\sigma_{д}$ – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.и.}$ – допускаемое напряжение материала рубашки

					ФЮРА	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным [31, 33].

Тогда:

$$S_p = \max \cdot \left(\frac{0,729 \cdot 1800}{2 \cdot 155 - 0,729}, \frac{1,282 \cdot 1800}{2 \cdot 218 - 1,282} \right) = 5,3 \text{ мм}$$

5.1.4 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки:

$$S \geq S_p + c \quad (5.6)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$S \geq 5,308 + 2 = 7,3 \text{ мм}$$

Примем ближайшее стандартное значение исполнительной толщины обечайки, а именно 8 мм.

5.1.5 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$P_d = \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.7)$$

Тогда:

$$P_d = \frac{2 \cdot 155 \cdot (8 - 2)}{1800 + (8 - 2)} = 1,03 \text{ МПа}$$

5.1.6 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$P_{д.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.20} \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.8)$$

Тогда:

$$P_{д.и} = \frac{2 \cdot 218 \cdot (8 - 2)}{1800 + (8 - 2)} = 1,449 \text{ МПа}$$

5.1.7 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$\frac{S - c}{D} = \frac{8 - 2}{1800} = 0,003 < 0,1 \quad (5,9)$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины обечайки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина обечайки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.2 Расчёт толщины стенки эллиптических днища и крышки от действия внутреннего давления

Название элементов – эллиптические днища и крышка. Номера позиций на расчётной модели – 8 и 9.

					ФЮРА	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Расчётные схемы эллиптических днища и крышки представлены на рисунках 8 и 9.

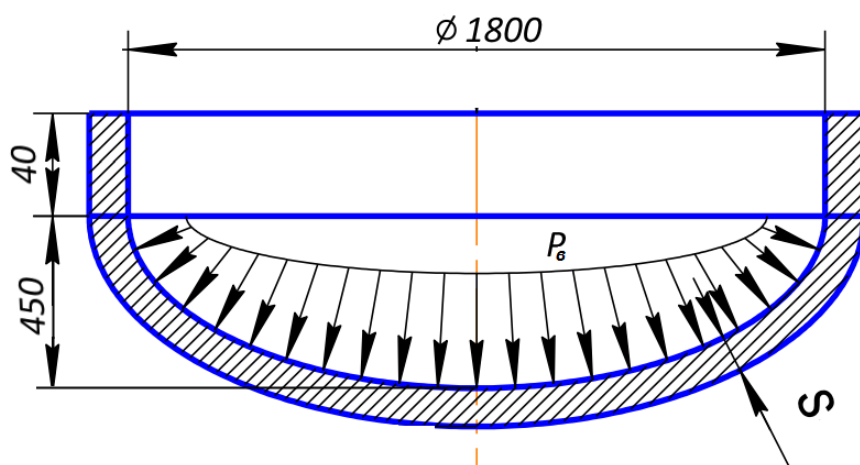


Рисунок 8 – Расчётная схема эллиптического днища

p_v – расчётное избыточное давление в рабочих условиях или пробное давление в условиях гидравлического испытания, МПа; s – исполнительная толщина эллиптического днища, мм.

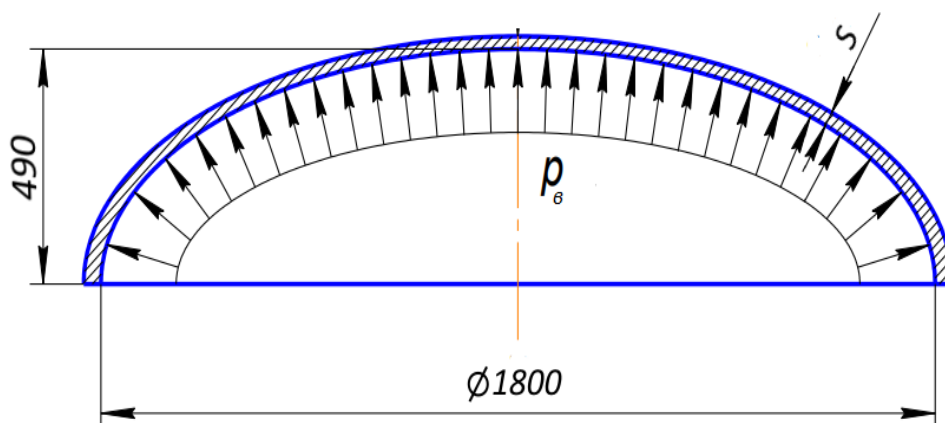


Рисунок 9 – Расчетная схема эллиптической крышки

p_v – расчётное избыточное давление в рабочих условиях или пробное давление в условиях гидравлического испытания, МПа; s – исполнительная толщина эллиптического днища, мм.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний радиус днища или крышки, мм, $R = 1800$;
- внутренняя высота выпуклой части днища или крышки, мм, $H = 450$;
- высота отбортовки днища или крышки, мм, $h_0 = 40$;
- внутреннее расчётное давление, МПа, $p = 0,729$ (рассчитано в пункте 5.1);
- пробное давление при гидравлическом испытании, МПа, $p_{ri} = 1,282$ (рассчитано в пункте 5.1);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для условий гидравлических испытаний, МПа, $\sigma_{d.20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

					ФЮРА	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптических днища и крышки, чтобы была обеспечена прочность данных конструкций. Проверкой прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$P \leq P_{д1} \quad (5.10)$$

где p – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа; $p_{д1}$ – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [33, 34].

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$P_{и} \leq P_{д1.и} \quad (5.11)$$

где $p_{и}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа; $p_{д1.и}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

Ввиду того, что днище и крышка работают в одинаковых условиях, их конструкция также будет идентичной, в связи с чем расчёт будет приведён только один раз.

5.2.1 Расчётная толщина эллиптического днища, нагруженного внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{1.p} = \max \left(\frac{p \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - 0.5 \cdot p}, \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20} - 0.5 \cdot p_{и}} \right) \quad (5.12)$$

где R – внутренний радиус эллиптического днища, мм; p – расчётное давление, МПа; $p_{и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; σ_d – допускаемое напряжение материала аппарата при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического днища равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$S_{1.p} = \max \cdot \left(\frac{0,729 \cdot 1800}{2 \cdot 155 - 0,729}, \frac{1,282 \cdot 1800}{2 \cdot 218 - 1,282} \right) = 5,3 \text{ мм}$$

5.2.2 Исполнительная толщина стенки эллиптического днища:

$$S_1 \geq S_{1.p} + c \quad (5.13)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$S_1 \geq 5,3 + 2 = 7,3 \text{ мм}$$

Примем ближайшее стандартное значение исполнительной толщины днища, а именно 8 мм [35].

5.2.3 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

					ФЮРА	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P_{д.1} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{R + 0.5(s_1 - c)} \quad (5.14)$$

Тогда:

$$P_{д.1} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 155}{1800 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 1.032 \text{ МПа}$$

5.2.4 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$P_{д.1.и} = \frac{2(s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{R + 0.5(s_1 - c)} \quad (5.15)$$

Тогда:

$$P_{д.1.и} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 218}{1800 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 1.451 \text{ МПа}$$

5.2.5 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p = 0.729 < 1.032 = P_{д.1}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптических днища и крышки для рабочих условий обеспечена.

5.2.6 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_H = 1.282 < 1.451 = P_{д.1.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность эллиптических днища и крышки для условий испытаний обеспечена.

5.2.7 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$0.002 < \frac{s_1 - c}{1800} = \frac{8 - 2}{1800} = 0.003 < 0.1, \quad (5.16)$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{450}{1800} = 0.25 < 0.5 \quad (5.17)$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища и крышки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина эллиптических днища и крышки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

					ФЮРА	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.3 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки от действия внутреннего давления

Названия элементов – цилиндрическая обечайка и днище гладкой теплообменной рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 10 и 11.

Расчётные схемы для обечайки и днища рубашки представлены на рисунках 10 и 11.

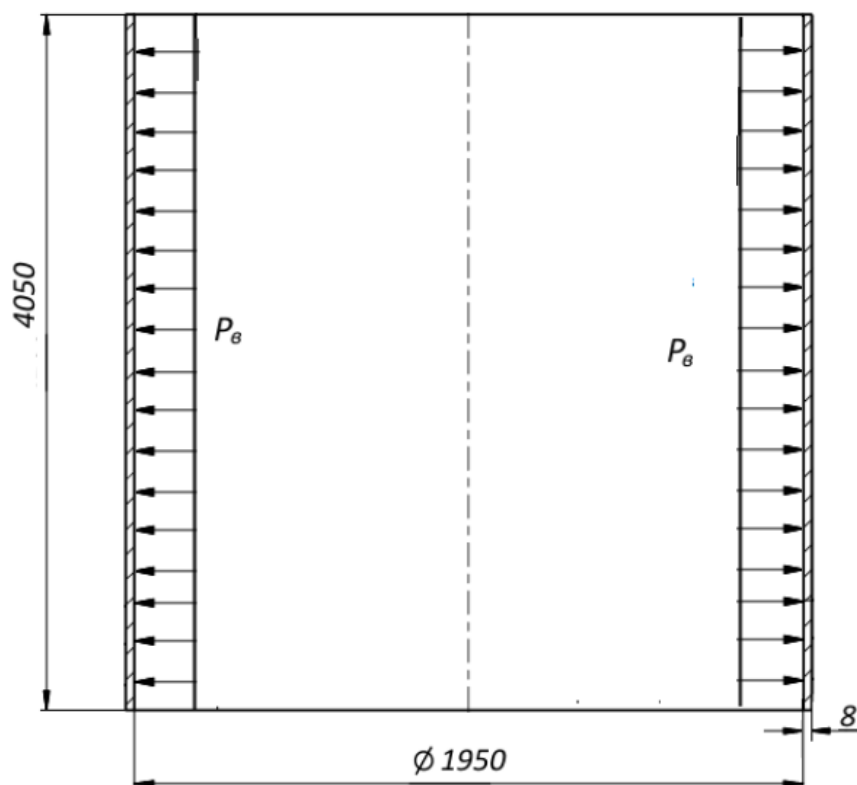


Рисунок 10 – Расчётная схема обечайки теплообменной рубашки

p_v – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа.

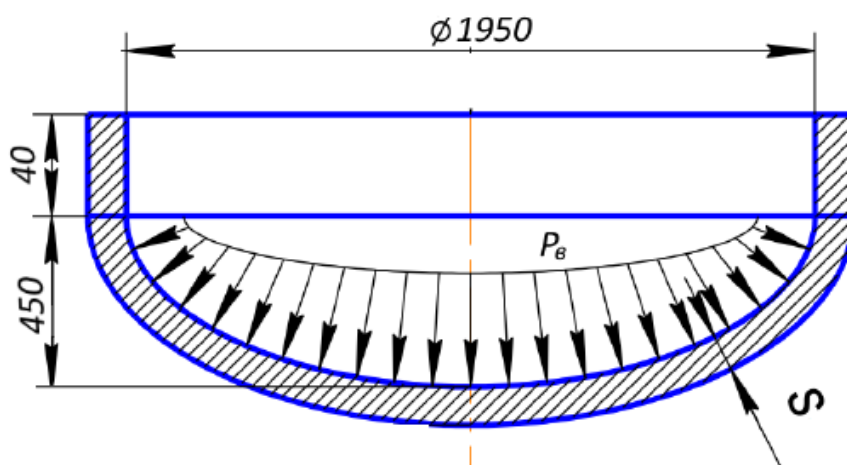


Рисунок 11 – Расчётная схема днища теплообменной рубашки

p_v – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа; s – исполнительная толщина стенки днища теплообменной рубашки, мм.

					ФЮРА	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр рубашки, мм, $D_p = 1950$;
- внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм, $R_p = 1950$;
- высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, мм, $h_{0p} = 40$;
- внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, мм, $H_p = 487,5$;
- внутреннее рабочее давление, МПа, $p_p = 0,1$;
- допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 153,5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 15ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа, $\sigma_{д.20} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки рубашки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции. Условием прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p_p \leq p_{д.р} \quad (5.18)$$

где p_p – расчётное значение внутреннее давления при рабочих условиях, МПа; $p_{д.р}$ – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [33].

Условием прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{р.и} \leq p_{д.р.и} \quad (5.19)$$

где $p_{р.и}$ – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа; $p_{д.р.и}$ – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [33].

5.3.1 Пробное давление для гидравлических испытаний рубашки [31]:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot p_p \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} \quad (5.20)$$

где p_p – расчетное давление при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р.20}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа.

Тогда:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot 0.1 \cdot \frac{155}{153.5} = 0.126 \text{ МПа}$$

Примем в качестве значения пробного давления минимально допустимое, а именно 0,2 МПа [27].

					ФЮРА	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.3.2 Расчётная толщина цилиндрической обечайки рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{p.p} = \max \left(\frac{p_p \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - p_{p.и}} \right) \quad (5.21)$$

где D_p – внутренний диаметр рубашки, мм; p_p – расчётное давление, МПа; $p_{p.и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $\sigma_{д.р}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.р.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа; ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$s_{p.p} = \max \left(\frac{0.1 \cdot 1950}{2 \cdot 153.5 - 0.1}, \frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 155 - 0.2} \right) = 1.259 \text{ мм}$$

5.3.3 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки:

$$s_p \geq s_{p.p} + c \quad (5.22)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s_p \geq 1.259 + 2 = 3.259 \text{ мм}$$

Для соблюдения условий устойчивости и обеспечения надёжности конструкции примем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки равной 8 мм [35].

5.3.4 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_{д.р} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.23)$$

Тогда:

$$p_{д.р} = \frac{2 \cdot 153.5 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.942 \text{ МПа}$$

5.3.5 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$p_{д.р.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.24)$$

Тогда:

$$p_{д.р.и} = \frac{2 \cdot 155 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.951 \text{ МПа}$$

					ФЮРА	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.3.6 Расчётная толщина эллиптического элемента рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [33]:

$$s_{1.p.p} = \max \left(\frac{p_p \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.p} - 0.5 \cdot p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.p.20} - 0.5 \cdot p_{p.и}} \right) \quad (5.25)$$

где R_p – внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм; p_p – расчётное давление, МПа; $p_{p.и}$ – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа; $\sigma_{д.p}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа; $\sigma_{д.p.и}$ – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа; ϕ – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического элемента рубашки равным 1 [31, 33].

Тогда:

$$s_{1.p.p} = \max \left(\frac{0.1 \cdot 1950}{2 \cdot 153.5 - 0.5 \cdot 0.1}, \frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 155 - 0.5 \cdot 0.2} \right) = 1.258 \text{ мм}$$

5.3.7 Исполнительная толщина стенки эллиптического элемента рубашки:

$$s_{1p} \geq s_{1p.p} + c \quad (5.26)$$

где c – прибавка на различные виды разрушений, мм [33].

Тогда:

$$s_{1p} \geq 1.258 + 2 = 3.258 \text{ мм}$$

В соответствии со стандартом на эллиптические отбортованные днища [35], примем ближайшую исполнительную толщину для данного диаметра, а именно 8 мм.

5.3.8 Допускаемое давление для рабочих условий [33]:

$$p_{д.1p} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.p}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.27)$$

Тогда:

$$p_{д.1p} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 153.5}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.943 \text{ МПа}$$

5.3.9 Допускаемое давление для условий испытания [33]:

$$p_{д.1p.и} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.p.20}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.28)$$

Тогда:

					ФЮРА	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P_{д.1р.н} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 155}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.952 \text{ МПа}$$

5.3.10 Проверим надёжность для рабочих условий:

$$p_p = 0.1 < 0.942 = P_{д.р.}$$

$$p_p = 0.1 < 0.943 = P_{д.1р}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность рубашки для рабочих условий обеспечена.

5.3.11 Проверим надёжность для условий гидравлического испытания:

$$P_{р.н} = 0.2 < 0.951 = P_{д.р.н.}$$

$$P_{р.н} = 0.2 < 0.952 = P_{д.1р.н}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, а надёжность рубашки для условий испытаний обеспечена.

5.3.12 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [33]:

$$0.002 < \frac{s_p - c}{D} = \frac{8 - 2}{1950} = 0.003 < 0.1,$$

$$0.002 < \frac{s_{1p} - c}{D} = \frac{8 - 2}{1950} = 0.003 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{487.5}{1950} = 0.25 < 0.5$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины рубашки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина обечайки и днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает прочность цилиндрических и эллиптических оболочек от действия внутреннего давления.

5.4 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическое днище корпуса. Номера позиций на расчётной модели – 7 и 9. Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем изображена на рисунке 12.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м, $D = 1,8$;
- радиус аппарата, м, $R = 0,9$;
- первый радиус эллипса крышки, м, $a = 0,9$;

					ФЮРА	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- второй радиус эллипса крышки, м, $b = 0,45$;
- высота аппарата, м, $H = 4,2$;
- толщина стенки обечайки аппарата, м, $s = 0,008$ (пункт 5.1);
- толщина стенки днища, м, $s_d = 0,008$ (пункт 5.2);
- рабочее давление в корпусе, Па, $P = 700000$;
- рабочее давление в рубашке, Па, $P_r = 100000$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 155 \cdot 10^6$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °C, $t_c = 70$;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\varphi = 1$ [31];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м, $c = 0,002$ (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный, $n_r = 2,4$ [31];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный, $n_i = 1,8$ [31];
- модуль упругости стали 12X18H10T при рабочей температуре среды, Па, $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный, $\mu = 0,3$ [34].

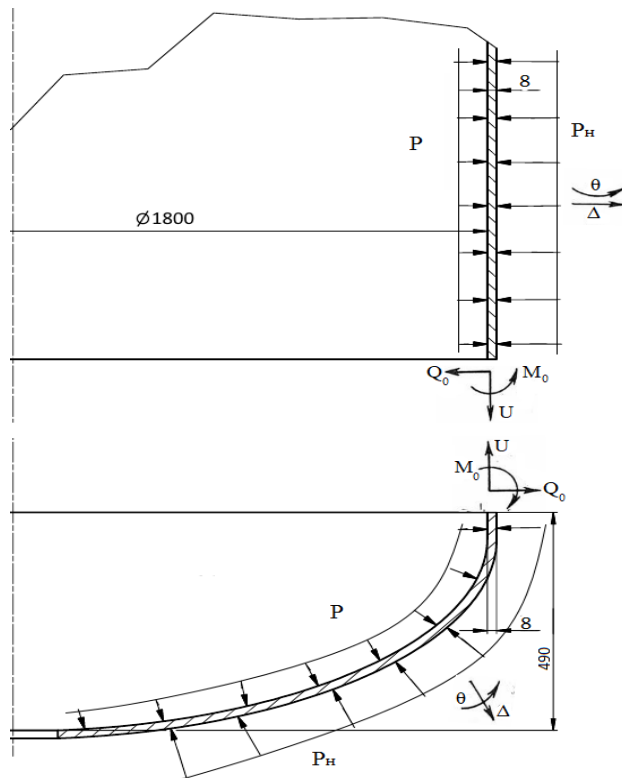


Рисунок 12 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем

					ФЮРА	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны среды в аппарате, Па; P_n – внешнее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па; Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м; M_0 – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н*м; U – радиальное усилие на краю обечаек, Н; Δ – краевые радиальные деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м; θ – краевые угловые деформации обечаек от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

Целью выполнения расчёта является проверка прочности соединения цилиндрической обечайки с днищем от возникающих при сопряжении краевых напряжений. Проверкой прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.29)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па; $\sigma_{\text{кр.д}}$ – допускаемое краевое напряжение, Па [34].

Для определения Q_0 и M_0 составляются уравнения совместности радиальных и угловых деформаций. Сущность этих уравнений в том, что для нормальной работы аппарата в узле сопряжения не должно быть никаких относительных перемещений сопрягаемых деталей.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем при воздействии внутреннего и внешнего давления:

$$\begin{cases} -\Delta_p^u + \Delta_{Q_0}^u - \Delta_{M_0}^u = -\Delta_p^3 - \Delta_{Q_0}^3 - \Delta_{M_0}^3 \\ -\theta_p^u + \theta_{Q_0}^u - \theta_{M_0}^u = \theta_p^3 + \theta_{Q_0}^3 + \theta_{M_0}^3 \end{cases} \quad (5.30)$$

где Δ_p^u , $\Delta_{Q_0}^u$, $\Delta_{M_0}^u$, θ_p^u , $\theta_{Q_0}^u$, $\theta_{M_0}^u$ – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок p , Q_0 и M_0 соответственно; где Δ_p^3 , $\Delta_{Q_0}^3$, $\Delta_{M_0}^3$, θ_p^3 , $\theta_{Q_0}^3$, $\theta_{M_0}^3$ – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок p , Q_0 и M_0 соответственно [34].

Формулы для определения радиальных и угловых деформаций берутся в соответствии с таблицей из пособия [34].

5.4.1 Коэффициент затухания:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} \quad (5.31)$$

Тогда для цилиндрической обечайки и эллиптического днища имеем:

					ФЮРА	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 17.492 \text{ 1/м},$$

$$\beta_{\text{э}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} = 17.492 \text{ 1/м}$$

5.4.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [34]:

$$\Delta_{\text{цРР}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P_{\text{Р}} = 5.57 \times 10^{-5} \text{ , (5.32)}$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 2.293 \times 10^{-8} \text{ , (5.33)}$$

$$\Delta_{\text{цР}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 3.899 \times 10^{-4} \text{ , (5.34)}$$

$$\Delta_{\text{цM0}} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \text{ , (5.35)}$$

$$\theta_{\text{цРР}} = 0 \text{ ,}$$

$$\theta_{\text{цР}} = 0 \text{ ,}$$

$$\theta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \text{ , (5.36)}$$

$$\theta_{\text{цM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.403 \times 10^{-5} \text{ (5.37)}$$

5.4.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [34]:

$$\Delta_{\text{эРР}} = P_{\text{Р}} \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -7.536 \times 10^{-5} \text{ , (5.38)}$$

$$\Delta_{\text{эР}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -5.275 \times 10^{-4} \text{ , (5.39)}$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}} \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 2.293 \times 10^{-8} \text{ , (5.40)}$$

$$\Delta_{\text{эM0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \text{ , (5.41)}$$

					ФЮРА	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\theta_{\text{эРР}} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{\text{эР}} = 0 \quad ,$$

$$\theta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.01 \times 10^{-7} \quad , \quad (5.42)$$

$$\theta_{\text{эM0}} = 4 \cdot \beta_{\text{э}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 1.403 \times 10^{-5} \quad (5.43)$$

5.4.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 1,715 \cdot 10^4 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.4.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{\text{мэ}} = -\sigma_{\text{Ррмэ}} + \sigma_{\text{Рмэ}} + \sigma_{\text{Q0мэ}} + \sigma_{\text{M0мэ}} \quad (5.44)$$

Где $\sigma_{\text{Ррмэ}}$, $\sigma_{\text{Рмэ}}$, $\sigma_{\text{Q0мэ}}$, $\sigma_{\text{M0мэ}}$ – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\sigma_{\text{мэ1}} = -P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} \quad ,$$

$$\sigma_{\text{мэ2}} = -P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} \quad ,$$

$$\sigma_{\text{мэ}} = \max(|\sigma_{\text{мэ1}}|, |\sigma_{\text{мэ2}}|) = 4.5 \times 10^7 \quad \text{Па}$$

5.4.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{\text{тэ}} = -\sigma_{\text{Рртэ}} + \sigma_{\text{Ртэ}} + \sigma_{\text{Q0тэ}} + \sigma_{\text{M0тэ}} \quad (5.45)$$

где $\sigma_{\text{Рртэ}}$, $\sigma_{\text{Ртэ}}$, $\sigma_{\text{Q0тэ}}$, $\sigma_{\text{M0тэ}}$ – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\sigma_{\text{тэ1}} = -P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\text{э}} \cdot \frac{a}{(s_{\text{э}} - c)} +$$

					ФЮРА	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\begin{aligned}
& + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2} = -6.343 \times 10^{-5} \text{ Па} , \\
\sigma_{t32} &= -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_3 - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + \\
& + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2} = -6.343 \times 10^{-5} \text{ Па} , \\
\sigma_{t3} &= \max(|\sigma_{t31}|, |\sigma_{t32}|) = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}
\end{aligned}$$

5.4.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{mo} = -\sigma_{Prmo} + \sigma_{Pmo} - \sigma_{Q0mo} + \sigma_{M0mo} \quad (5.46)$$

Где σ_{Prmo} , σ_{Pmo} , σ_{Q0mo} , σ_{M0mo} – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\begin{aligned}
\sigma_{mo1} &= -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} , \\
\sigma_{mo2} &= -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 4.5 \times 10^7 \text{ Па} , \\
\sigma_{mo} &= \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}
\end{aligned}$$

5.4.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{to} = -\sigma_{Ppto} + \sigma_{Pto} - \sigma_{Q0to} + \sigma_{M0to} \quad (5.47)$$

Где σ_{Ppto} , σ_{Pto} , σ_{Q0to} , σ_{M0to} – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками Q_0 и M_0 . [34].

Тогда:

$$\begin{aligned}
\sigma_{to1} &= -P_p \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + \\
& + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па} ,
\end{aligned}$$

					ФЮРА	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{to2} = -P_p \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} -$$

$$- 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па},$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 6.343 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

5.4.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [34]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 2.763 \times 10^8 \text{ Па} \quad (5.48)$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxо} = \max(\sigma_{мо}, \sigma_{то}) = 4.5 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.4.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{maxэ} = 4.5 \cdot 10^7 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д},$$

$$\sigma_{maxо} = 4.5 \cdot 10^7 < 2.015 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

Условие прочности выполняется. Делаем вывод, что принятая в пунктах 5.1 и 5.2 исполнительная толщина цилиндрической обечайки и эллиптического днища корпуса, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.5 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка рубашки, эллиптическое днище рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 10 и 11.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем представлена на рисунке 13.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м, $D = 1,95$;
- радиус аппарата, м, $R = 0,975$;
- первый радиус эллипса крышки, м, $a = 0,975$;
- второй радиус эллипса крышки, м, $b = 0,488$;
- толщина стенки обечайки рубашки, м, $s = 0,008$ (пункт 5.3);
- толщина стенки днища, м, $s_d = 0,008$ (пункт 5.3);
- рабочее давление в рубашке, Па, $P = 100000$;

					ФЮРА	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа, $\sigma_d = 153,5 \cdot 10^6$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °С, $t_c = 70$;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\phi = 1$ [31];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м, $s = 0,002$ (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный, $n_p = 2,4$ [31];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный, $n_{\text{и}} = 1,8$ [31];
- модуль упругости материала аппарата при рабочей температуре среды, Па, $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный, $\mu = 0,3$ [34].

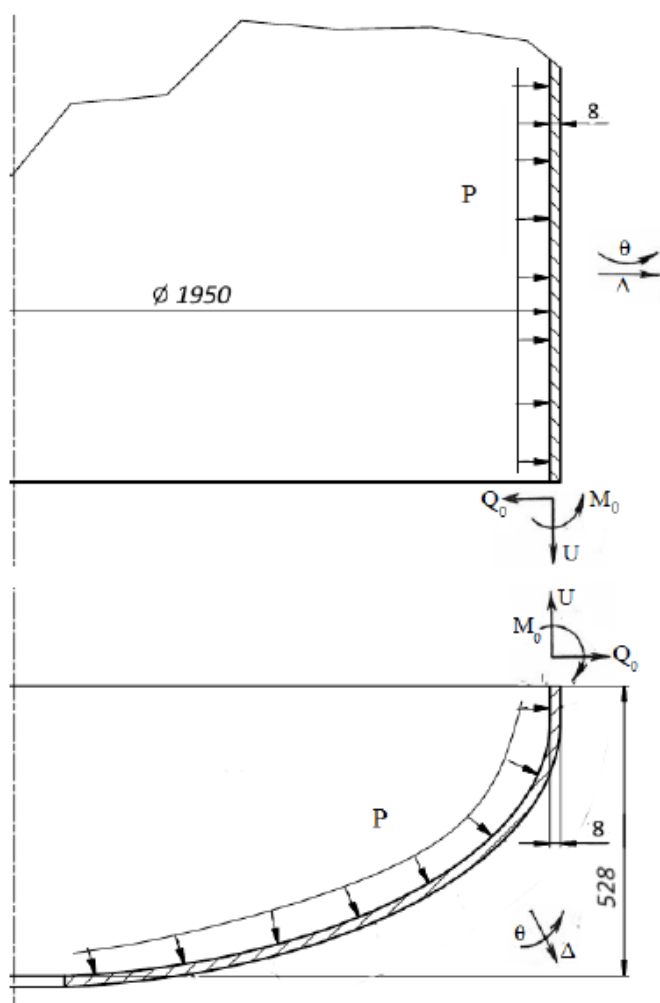


Рисунок 13 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем

P – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па; Q_0 – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м; M_0 – краевой момент, действующий на

					ФЮРА	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

соединённые обечайки, Н*м; U – радиальное усилие на краю обечайки, Н; Δ – краевые радиальные деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м; θ – краевые угловые деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка того, выдержит ли соединение цилиндрической обечайки с днищем возникающих при сопряжении краевых напряжений. Условием прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.49)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па; $\sigma_{\text{кр.д}}$ – допускаемое краевое напряжение, Па [34].

Реализуемый принцип расчёта – тот же, что и в предыдущем подразделе.

5.5.1 Коэффициент затухания [34]:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м},$$

$$\beta_{\text{э}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м}$$

5.5.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [34]:

$$\Delta_{\text{цР}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 6.537 \times 10^{-5} \text{ ,}$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 2.585 \times 10^{-8} \text{ ,}$$

$$\Delta_{\text{цM0}} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7} \text{ ,}$$

$$\theta_{\text{цР}} = 0 \text{ ,}$$

$$\theta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7} \text{ ,}$$

$$\theta_{\text{цM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.46 \times 10^{-5}$$

5.5.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [34]:

					ФЮРА	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta_{\varepsilon P} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\varepsilon} - c)]} \cdot \left(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -8.845 \times 10^{-5},$$

$$\Delta_{\varepsilon Q0} = 2 \cdot \beta_{\varepsilon} \cdot \frac{a^2}{(s_{\varepsilon} - c) \cdot E} = 2.585 \times 10^{-8},$$

$$\Delta_{\varepsilon M0} = 2 \cdot \beta_{\varepsilon}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\varepsilon} - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\varepsilon P} = 0,$$

$$\theta_{\varepsilon Q0} = 2 \cdot \beta_{\varepsilon}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\varepsilon} - c) \cdot E} = 4.345 \times 10^{-7},$$

$$\theta_{\varepsilon M0} = 4 \cdot \beta_{\varepsilon}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\varepsilon} - c) \cdot E} = 1.46 \times 10^{-5}$$

5.5.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 2,975 \cdot 10^3 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.5.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\sigma_{m\varepsilon 1} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\varepsilon} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\varepsilon} - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{m\varepsilon 2} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\varepsilon} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\varepsilon} - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{m\varepsilon} = \max(|\sigma_{m\varepsilon 1}|, |\sigma_{m\varepsilon 2}|) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

5.5.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\begin{aligned} \sigma_{t\varepsilon 1} = P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2} \right)}{[2 \cdot (s_{\varepsilon} - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_{\varepsilon} \cdot \frac{a}{(s_{\varepsilon} - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_{\varepsilon}^2 \cdot \frac{a}{(s_{\varepsilon} - c)} + \\ + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_{\varepsilon} - c)^2} = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па}, \end{aligned}$$

					ФЮРА	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{t32} = P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_3 - c)\right]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_3 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_3^2 \cdot \frac{a}{(s_3 - c)} -$$

$$- 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_3 - c)^2} = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{t3} = \max(|\sigma_{t31}|, |\sigma_{t32}|) = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

5.5.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

$$\sigma_{mo1} = P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mo2} = P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 8.125 \times 10^6 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mo} = \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

5.5.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

$$\sigma_{to1} = -P \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to2} = -P \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -3.688 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 3.688 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

5.5.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [34]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 1.996 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища [34]:

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки [34]:

					ФЮРА	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{\max o} = \max(\sigma_{mo}, \sigma_{to}) = 8.125 \times 10^6 \text{ Па}$$

5.5.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{\max \varepsilon} = 8.125 \cdot 10^6 < 1.996 \cdot 10^8 = \sigma_{\text{кр.д}}$$

$$\sigma_{\max o} = 8.125 \cdot 10^6 < 1.996 \cdot 10^8 = \sigma_{\text{кр.д}}$$

Условие прочности выполняется. Делаем вывод, что принятая в пункте 5.3 исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки и эллиптического днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

5.6 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, гладкая теплообменная рубашка. Номера позиций на расчётной модели – 7 и 10.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с теплообменной рубашкой представлена на рисунке 14.

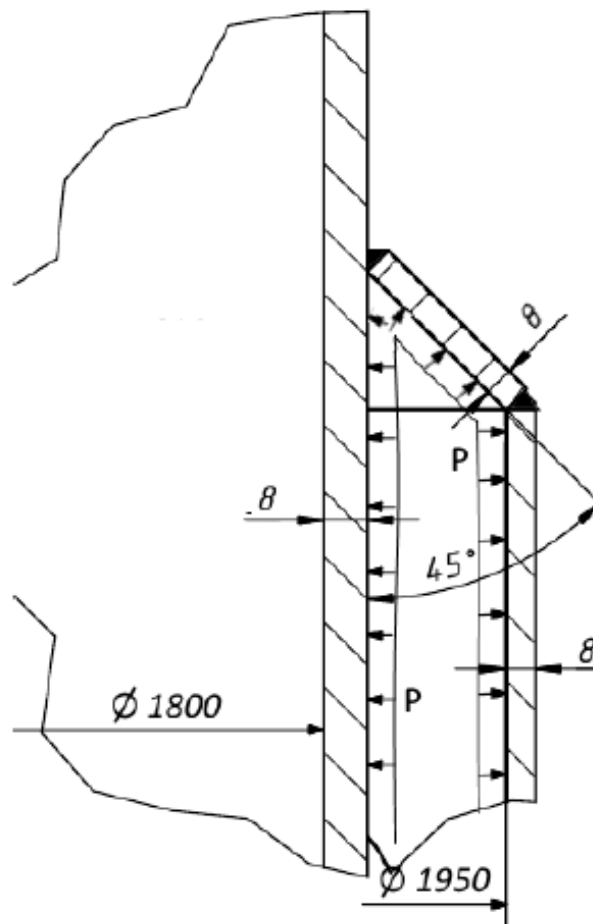


Рисунок 14 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с гладкой теплообменной рубашкой

					ФЮРА	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, мм, $D_1 = 1800$;
- внутренний диаметр рубашки, мм, $D_2 = 1950$;
- диаметр сопряжения рубашки с корпусом у днища, мм, $d_1 = 280$ [36];
- толщина стенки обечайки аппарата, мм, $s_1 = 8$ (пункт 5.1);
- толщина стенки обечайки рубашки, мм, $s_2 = 8$ (пункт 5.3);
- прибавка к толщине стенки, мм, $c = 2$ (пункт 4.3);
- угол сопряжения, °, $\alpha = 45$ [36];
- расстояние от середины стенки рубашки до наружной стенки аппарата, мм, $e_0 = 71$ [36];
- расчётное давление в аппарате, МПа, $p_{\text{кор}} = 0,729$ (пункт 5.1);
- рабочее давление в рубашке, МПа, $p_{\text{руб}} = 0,1$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T для рабочих условий, МПа, $\sigma_{\text{д.кор}} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 15ХМ для рабочих условий, МПа, $\sigma_{\text{д.руб}} = 153,5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный, $\varphi_{\text{т1}} = 1$ [31].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции сопряжения теплообменной рубашки с корпусом аппарата. Условием прочности является выполнение следующего условия:

$$p_{\text{руб}} \leq p_{\text{д.руб}} \quad (5.50)$$

где $p_{\text{руб}}$ – расчётное давление в рубашке при рабочих условиях, МПа; $p_{\text{д.руб}}$ – допускаемое давление в рубашке при рабочих условиях, МПа [36].

В соответствии с рекомендациями стандарта [36] был выбран тип сопряжения рубашки с корпусом при помощи конуса. Исполнительная толщина стенки сопряжения рассчитывается методом итераций в соответствии с методикой стандарта [36].

5.6.1 В первом приближении принимаем толщину сопряжения равной толщине стенки теплообменной рубашки. Вычислим по формулам стандарта [36] вспомогательные параметры.

5.6.2 Коэффициент осевого усилия [36]:

$$A = \frac{(D_1 \cdot D_2 - d_1^2)}{D_2^2} = 0.902 \text{ мм} \quad (5.51)$$

					ФЮРА	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.6.3 Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой.

Согласно [36]:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{\sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} = 0.656 \quad (5.52)$$

5.6.4 Коэффициент радиуса конической отбортовки ρ принимаем равным нулю в соответствии с приложением А стандарта [36].

5.6.5 Коэффициент длины сопряжения при угле сопряжения 45° [36]:

$$\lambda = \varepsilon \cdot \sqrt{2} + 0.45 \cdot \rho = 0.928 \quad (5.53)$$

5.6.6 Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки [36]:

$$\chi = 1.25 \left[\frac{\left[\frac{\sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c) \cdot \sqrt{D_1 \cdot (s_1 - c)}}{\sigma_{д.руб} \cdot (s_2 - c) \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} \right]}{\left[\sqrt{1 - \frac{(p_{кор} \cdot D_1)}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c)}} + \sqrt{1 - \frac{(p_{кор} - p_{руб}) \cdot D_1}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c)}} \right]} \right] = 1.417 \quad (5.54)$$

5.6.7 Расчётные коэффициенты прочности сварного шва [36]:

$$\varphi_{p1} = \varphi_{т1} \cdot \frac{\min(\sigma_{д.кор}, \sigma_{д.руб})}{\sigma_{д.руб}} = 1 \quad (5.55)$$

$$\varphi_{p2} = 1$$

5.6.8 Коэффициент φ_{p2} принимается равным единице, поскольку исполнительная длина укрепления стенки рубашки в месте сопряжения с помощью конуса равна [36]:

$$l_R \geq 0.5 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)} = 54.083 \quad (5.56)$$

Примем величину l_R равной 95 мм.

5.6.9 Относительная эффективная несущая длина конуса [36]:

$$\mu = \min \left[\frac{\varepsilon}{\sin(\alpha)}, \sqrt{\frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)}} \right] = 0.841 \quad (5.57)$$

5.6.10 Коэффициент сопряжения с помощью конуса:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) \quad (5.58)$$

где X_1, X_2, X_3 – вспомогательные величины, определяемые относительно коэффициентов f_1, f_2, f_3, f_4 [36].

5.6.11 Первый коэффициент при выполнении условия [36]:

					ФЮРА	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\lambda = 0.928 > \frac{|\chi - 1|}{2} = 0.208 \quad (5.59)$$

рассчитывается по следующей формуле [36]:

$$f_1 = 1 \cdot \left[1 + \lambda + \chi - \frac{(\chi - 1)^2}{4\lambda} \right] = 3.298 \quad (5.60)$$

5.6.12 Формула второго коэффициента выбирается исходя из угла сопряжения. Предварительно рассчитываются следующие вспомогательные величины [36]:

$$\varepsilon_0 = 0.60 \cdot \sqrt{1 + 0.83 \cdot \rho + 0.37 \cdot \rho^2} = 0.6 \quad (5.61)$$

Поскольку ε больше, чем ε_0 , следующий вспомогательный параметр рассчитывается по формуле [36]:

$$z = 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) = 1.828 \quad (5.62)$$

Таким образом [36]:

$$f_2 = 0.71 + 0.52 \cdot \rho + \varepsilon \cdot z = 1.91 \quad (5.63)$$

5.6.13 Третий вспомогательный коэффициент [36]:

$$f_3 = 1 + \left[\frac{\left[12 \cdot \rho^3 \cdot \left(\frac{0.2}{\varepsilon} \right)^4 \right]}{12 \cdot \varepsilon + \rho^2 \cdot \max \left[0, \left(\frac{0.5}{\varepsilon} \right)^3 - 1 \right]} \right] = 1 \quad (5.64)$$

5.6.14 Формула для четвёртого вспомогательного коэффициента также берётся исходя из того, что угол сопряжения равен 45° [36].

$$f_4 = \max \left[1, \min \left[1, 0.8 + \left(\frac{6.0}{100 \cdot \varepsilon} \right) + \left(\frac{\rho}{2} \right) \cdot \min \left[1, \frac{\left(\frac{4}{3} \right)}{1 + \varepsilon \cdot [1 + \varepsilon \cdot (1 + 5.5 \cdot \varepsilon)]} \right] \right] \right] = 1 \quad (5.65)$$

5.6.15 Вспомогательные коэффициенты X_1 , X_2 , X_3 [36]:

$$X_1 = \left(\frac{\cos(\alpha)}{\varepsilon} \right) \cdot \left[\left(\frac{\varphi_{p1} + \varphi_{p2}}{4 \cdot \cos(\alpha)} \right) + \lambda \cdot f_1 \right] = 4.06 \quad (5.66)$$

$$X_2 = f_2 \cdot \sqrt{1 + \varphi_{p2}} = 2.701 \quad (5.67)$$

$$X_3 = \chi \cdot f_3 + \left[\left(\frac{\varphi_{p1} + \varphi_{p2}}{4 \cdot \mu \cdot \cos(\alpha)} \right) + \mu \right] \cdot f_4 = 3.098 \quad (5.68)$$

					ФЮРА	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тогда:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) = 0.3$$

5.6.16 Допускаемое давление в рубашке:

$$p_{д.руб} = \frac{2 \cdot \sigma_{д.руб} \cdot (s_2 - c) \cdot \varphi_{п2}}{D_2 + (s_2 - c)} \cdot \frac{B}{A} = 0.313 \text{ МПа (5.69)}$$

где $\varphi_{п2}$ – коэффициент прочности сварного шва рубашки, принимаемый равным единице согласно [36].

5.6.17 Осуществим проверку критерия прочности:

$$p_{руб} = 0.1 < 0.313 = p_{д.руб}$$

Условие прочности по допускаемому избыточному давлению выполняется.

Таким образом, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина сопряжения, равная 8 мм, обеспечивает необходимую надёжность конструкции.

5.7 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическая крышка корпуса, фланцевое соединение. Номера позиций на расчётной модели – 7, 8, 12.

Расчётные схемы фланцевого соединения представлены на рисунках 15 и 16.

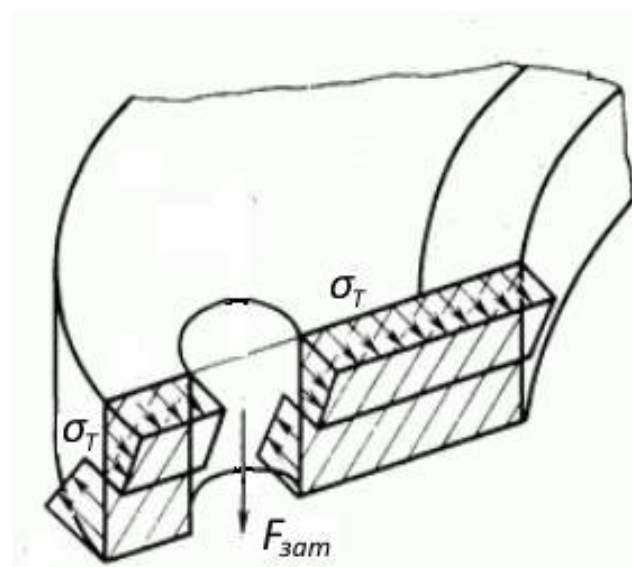


Рисунок 15 – Уточняющая расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

					ФЮРА	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

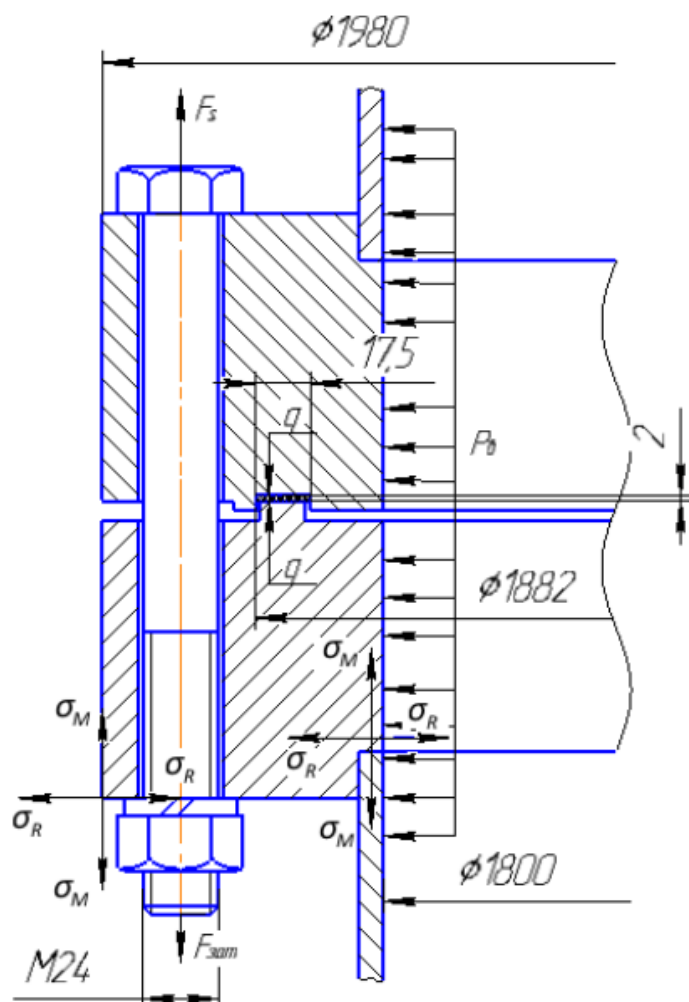


Рисунок 16 – Расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

P_0 – внешнее давление атмосферы на аппарат, МПа; F_s – усилие, действующее на болты со стороны среды аппарата, Н; $F_{зат}$ – усилие, действующее на болты при затяжке, Н; q – удельное давление обжатия прокладки, МПа; σ_R , σ_M , σ_T – соответственно радиальные, меридиональные и кольцевые напряжения в тарелке или обечайке фланца, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, мм, $D_1 = 1800$;
- наружный диаметр фланца, мм, $D_n = 1980$;
- диаметр болтовой окружности, мм, $D_b = 1930$;
- диаметр середины прокладки, мм, $D_{сп} = 1864,5$;
- ширина прокладки, мм, $b_n = 17,5$;
- высота фланца, мм, $h = 95$;
- высота прокладки, мм, $h_n = 2$;
- толщина обечайки и крышки, мм, $s_0 = 8$ (пункты 5.1 и 5.2);
- диаметр болтов, мм, $d = 24$;
- число болтов, шт, $n = 84$;

					ФЮРА	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- площадь поперечного сечения болта, мм², $f_b = 324$;
- расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта, мм, $L_{60} = 174$;
- расчётное наружное давление на крышки, МПа, $P = 0,729$ (пункт 5.1);
- внешняя осевая сжимающая сила, Н, $F = 0$;
- внешний изгибающий момент, Н*мм, $M = 0$;
- прибавка к толщине стенки, мм, $c_o = 2$;
- температура среды в аппарате, °С, $t = 70$;
- рабочая температура фланца, °С, $t_f = 67,2$;
- рабочая температура болтов, °С, $t = 59,5$;
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $\sigma_{д.ф} = 178$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при условиях испытаний, МПа, $\sigma_{20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 20 при рабочих условиях, МПа, $\sigma_{д.б} = 143$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 20 при условиях испытаний, МПа, $\sigma_{д.б} = 147$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $E = 2,0 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 12X18H10T при условиях испытаний, МПа, $E = 2,0 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 20 при рабочих условиях, МПа, $E_b = 1,91 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- модуль продольной упругости стали 20 при условиях испытаний, МПа, $E_{20б} = 1,99 \cdot 10^5$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент линейного расширения стали 12X18H10T, °С⁻¹, $\alpha_f = 16,6 \cdot 10^{-6}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- коэффициент линейного расширения стали 20, °С⁻¹, $\alpha_b = 11,6 \cdot 10^{-6}$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- прокладочный коэффициент, безразмерный, $m = 2,5$ [38];
- удельное давление обжатия прокладки, МПа, $q_{обж} = 10$ [38];
- допускаемое удельное давление на прокладку, МПа, $q_d = 40$ [38];
- коэффициент обжатия, безразмерный, $K_{обж} = 1$ [38];
- условный модуль сжатия прокладки, МПа, $E_{п} = 0,02 \cdot 10^5$ [38].

					ФЮРА	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Показателями механической надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствия угла поворота фланца допускаемому значению. Данные критерии описываются следующими условиями:

$$\sigma_{61} \leq \sigma_{206} \quad (5.70)$$

где σ_{61} – напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа [38].

$$\sigma_{62} \leq \sigma_{д.6} \quad (5.71)$$

где σ_{62} – напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа [38].

$$q \leq q_d \quad (5.72)$$

где q – удельное давление на прокладку, МПа; q_d – допускаемое удельное давление на прокладку, МПа [38].

$$\sigma_{3\max} < K_T \cdot \sigma_{20} \quad (5.73)$$

$$\sigma_{P\max} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \quad (5.74)$$

где $\sigma_{3\max}$ – максимальное напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа; $\sigma_{P\max}$ – максимальное напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа; K_T – коэффициент, учитывающий температурные деформации, принимаемый равным 1,3 [38].

$$\Theta \leq 1,3 \cdot \Theta_d \quad (5.75)$$

где Θ – величина угла поворота фланца, °; Θ_d – допускаемая величина угла поворота фланца, ° [38].

В соответствии с рекомендациями [34] по привалочной поверхности выбран тип фланца шип-паз, поскольку именно такой тип обеспечивает достаточную герметичность аппарата, содержащего агрессивные и токсичные среды. По стандарту [37] выбрана пара фланцев типа шип-паз и исполнения 2 и 3 в соответствии с диаметром аппарата, равным 1800 мм.

Весь дальнейший расчёт производится в соответствии со стандартом [38].

5.7.1 Эффективная ширина плоской прокладки для случая, когда реальная её ширина больше 15 мм:

$$b_0 = \text{Ceil}(3,8 \sqrt{b_{п,1}}) = 16 \text{ мм} \quad (5.76)$$

где ceil – функция округления в большую сторону [38].

5.7.2 Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке [38]:

$$P_{обж} = 0,5 \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 8,54 \times 10^4 \text{ МПа} \quad (5.77)$$

					ФЮРА	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.7.3 Усилие на прокладке в рабочих условиях R_p , необходимое для герметичности фланцевого соединения, для расчёта на наружное давление принимается равным нулю [38].

5.7.4 Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы [38]:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 2.722 \times 10^4 \text{ мм}^2 \quad (5.78)$$

5.7.5 Равнодействующая нагрузка от давления [38]:

$$Q_d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп})^2 \cdot P \quad Q_d = 1.99 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.79)$$

5.7.6 Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента [38]:

$$Q_{FM} = \max \left(\left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{сп}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{сп}} \right| \right) = 0 \quad (5.80)$$

5.7.7 Податливость прокладки [38]:

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \cdot K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{\Pi}} = 9.756 \times 10^{-9} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.81)$$

5.7.8 Эффективная длина болта при определении податливости [38]:

$$L_6 = L_{60} + 0.28 \cdot d = 180.72 \text{ мм} \quad (5.82)$$

5.7.9 Податливость болтов [38]:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 3.337 \times 10^{-8} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.83)$$

5.7.10 Расчётные параметры фланцев [38]:

- параметр длины обечайки:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = 120 \text{ мм} \quad (5.84)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K = \frac{D_H}{D} = 1.1 \quad (5.85)$$

- коэффициенты, зависящие от размеров тарелки фланца [38]:

					ФЮРА	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.875, \quad (5.86)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 22.347, \quad (5.87)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 20.542, \quad (5.88)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 10.524 \quad (5.89)$$

- коэффициенты β_F , β_V и f по рекомендациям стандарта [38] принимаем для плоского фланца типа шип-паз равными соответственно 0.91, 0.55 и 1;
- коэффициент λ [38]:

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 3.665 \quad (5.90)$$

5.7.11 Угловая податливость фланцев при затяжке [38]:

$$y_\Phi = \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 8.891 \times 10^{-11} \quad (5.91)$$

5.7.12 Угловая податливость фланцев, нагруженных внешним изгибающим моментом [38]:

$$y_{\Phi H} = \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} = 2.754 \times 10^{-12} \quad (5.92)$$

5.7.13 Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами [38]:

$$C_F = \max \left[1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left(2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] = 1 \quad (5.93)$$

5.7.14 Приведённый диаметр фланца $D_{пр}$ принимаем равным внутреннему диаметру аппарата, а именно 1800 мм.

5.7.15 Плечо действия усилий в болтах для приварных плоских фланцев [38]:

					ФЮРА	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$b = 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) = 32.75 \text{ мм} \quad (5.94)$$

5.7.16 Плечо усилия от действия давления на фланец [38]:

$$e = 0.5(D_{\text{сп}} - D - S_0) = 28.25 \text{ мм} \quad (5.95)$$

5.7.17 Эквивалентную толщину втулки плоских фланцев принимаем по рекомендации [38] равной толщине аппарата и крышки, а именно 14 мм.

5.7.18 Коэффициент жёсткости для плоских фланцев [38]:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 4.251 \times 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad (5.96)$$

5.7.19 Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для плоских фланцев с плоскими прокладками [38]:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} = 1.662 \quad (5.97)$$

5.7.20 Коэффициент жёсткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом [38]:

$$\alpha_M = \frac{y_6 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b \cdot \left(b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_6 + y_{\text{п}} \cdot \left(\frac{D_6}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b^2} = 0.891 \quad (5.98)$$

5.7.21 Нагрузка, вызванная стеснённостью температурных деформаций в соединениях с плоскими фланцами [38]:

$$Q_t = \gamma \cdot [2\alpha_{\text{ф}} \cdot h \cdot (t_{\text{ф}} - 20) - 2\alpha_6 \cdot h \cdot (t_6 - 20)] = 2.628 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.99)$$

5.7.22 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения [38] (поскольку на фланцевое соединение не действуют внешние изгибающие моменты, принимаем М равным нулю):

$$P_{61} = \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = 3.478 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.100)$$

					ФЮРА	Лист
						73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.7.23 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов [38]:

$$P_{62} = \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206}) = 1.6 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.101)$$

5.7.24 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения [38]:

$$P_{6м} = \max(P_{61}, P_{62}) = 3.478 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.102)$$

5.7.25 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях [38]:

$$P_{6р} = P_{6м} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{сп}} = 2.424 \times 10^6 \text{ Н} \quad (5.103)$$

5.7.26 Расчётное напряжение в болтах [38]:

- при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_{6м}}{A_6} = 127.8 \text{ МПа} \quad (5.104)$$

- при рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_{6р}}{A_6} = 89.064 \text{ МПа} \quad (5.105)$$

5.7.27 Проверка условия прочности болтов при затяжке (5.70) и в рабочих условиях (5.71):

$$\sigma_{61} = 127.81 < 147 = \sigma_{206},$$

$$\sigma_{62} = 89.064 < 143 = \sigma_{д.6}$$

Поскольку условия (5.70) и (5.71) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.28 Удельное давление на прокладку [38]:

$$q = \frac{\max(P_{6м}, P_{6р})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 33.934 \text{ МПа} \quad (5.106)$$

5.7.29 Для мягкой прокладки из фторопласта-4 произведём проверку условия прочности (5.72):

$$q = 33.934 < 40 = q_d$$

					ФЮРА	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Условие (5.72) выполняется, в связи с чем можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.30 Расчетный изгибающий момент, действующий на плоский фланец при затяжке [38]:

$$M_M = C_F \cdot P_{6M} \cdot b = 1.139 \times 10^8 \text{ Н·мм} \quad (5.107)$$

5.7.31 Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях [38]:

$$M_P = C_F \cdot \max [P_{6P} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 1.356 \times 10^8 \text{ Н·мм} \quad (5.108)$$

5.7.32 Расчётные напряжения во фланце при затяжке [38]:

- меридиональное изгибное напряжение в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 479.672 \text{ МПа} \quad (5.109)$$

- радиальное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{RM} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 3.747 \text{ МПа} \quad (5.110)$$

- окружное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{TM} = \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 104.625 \text{ МПа} \quad (5.111)$$

5.7.33 Расчётные напряжения во фланцах в рабочих условиях [38]:

- меридиональное изгибное напряжение для плоских фланцев:

$$\sigma_{0P} = \frac{M_P}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 571.019 \text{ МПа} \quad (5.112)$$

- максимальное меридиональное мембранное напряжение в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0MP} = \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)} \right] = 58.404 \text{ МПа} \quad (5.113)$$

					ФЮРА	Лист
						75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.7.34 Напряжения в тарелке плоского фланца в рабочих условиях [38]:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 4.46 \text{ МПа} \quad (5.114)$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 124.55 \text{ МПа} \quad (5.115)$$

5.7.35 Осуществим проверку условия статической прочности фланцев при затяжке (5.73) и рабочих условиях (5.74).

Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях [38]:

$$\sigma_{Pmax} = \max \left(\begin{pmatrix} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{pmatrix} \right) = 637.165 \text{ МПа} \quad (5.116)$$

Максимальное напряжение во фланце при условиях затяжки [38]:

$$\sigma_{3max} = \max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|) = 584.298 \text{ МПа} \quad (5.117)$$

Осуществляем непосредственную проверку условий:

$$\begin{aligned} \sigma_{3max} &= 584.298 < 1.3 \cdot 3 \cdot 184 = 717.6 = \sigma_{20}, \\ \sigma_{Pmax} &= 637.165 < 1.3 \cdot 3 \cdot 178 = 694.2 = \sigma_{д.ф} \end{aligned}$$

Поскольку условия (5.73) и (5.74) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

5.7.36 Угол поворота плоского фланца [38]:

$$\Theta = M_p \cdot y_\Phi \cdot \frac{E_{20}}{E} = 0.012^\circ \quad (5.118)$$

5.7.37 Осуществим проверку условия прочности по углу поворота фланца (5.75). Учтём при этом, что допускаемый угол поворота фланца по стандарту [38] равен 0.013 градусов.

$$\Theta = 0.012 < 0.013 \cdot 1.3 = 0.017 = \Theta_d$$

Поскольку неравенство (5.75) выполняется, делаем вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции по данному условию прочности.

					ФЮРА	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.7.38 Результаты расчета:

- условие прочности соединения по болтам в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.7.27);
- условие прочности соединения по прокладке – выполняется (пункт 5.7.29);
- условие статической прочности соединения в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.7.35);
- условие прочности соединения по углу поворота фланца – выполняется (пункт 5.7.37).

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают полную надёжность конструкции соединения.

5.8 Расчёт опор аппарата

Названия элементов – опорные лапы аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 13. Расчётная схема крепления опорных лап представлена на рисунке 17.

Исходные данные для расчёта:

- масса эллиптической крышки, кг, $m_{э,к} = 237,3$ [35];
- масса днища рубашки, кг, $m_{д,р} = 276,3$ [35];
- длина развёртки цилиндрической обечайки, м, $l_{ц} = 5,655$;
- высота цилиндрической обечайки, м, $H_{ц} = 4,2$ [21];
- толщина стенки цилиндрической обечайки, м, $s_{ц} = 0,008$ (пункт 5.1);
- объём аппарата, м³, $V_{кор} = 12,5$ [21];
- плотность материала корпуса, кг/м³, $\rho_{ст} = 7920$ [39];
- диаметр рубашки, мм, $D_p = 1950$;
- длина развёртки обечайки рубашки, м, $l_{цр} = 6,126$;
- высота обечайки рубашки, м, $H_{цр} = 4,05$ [21];
- толщина стенки рубашки, м, $s_{цр} = 0,008$ (пункт 5.3);
- плотность материала рубашки, кг/м³, $\rho_{ст,р} = 7830$ [39];
- давление гидроиспытания в рубашке, МПа, $p = 0,2$ (пункт 5.3);
- допускаемое напряжение стали 15ХМ, МПа, $\sigma_{д,руб} = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- масса фланцевого соединения, кг, $m_{ф} = 697,3$ [37];
- масса привода, кг, $m_{п} = 538$ [24];
- масса мешалки, кг, $m_{м} = 5.11$ [24].

					ФЮРА	Лист
						77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

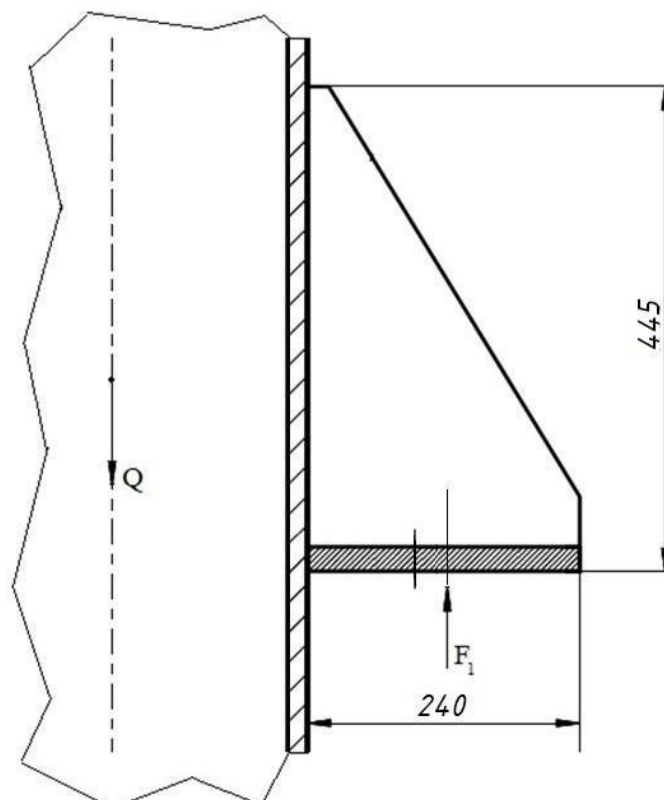


Рисунок 17 – Расчётная схема крепления опорных лап

Q – нагрузка на опоры со стороны аппарата, кН; F_1 – вертикальное усилие на опорную стойку, кН.

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции опор. Условием прочности является следующее условие:

$$F_1 \leq F_{1,д} \quad (5.119)$$

где F_1 – сила, с которой опора действует на подкладной лист и обечайку рубашки аппарата, Н; $F_{1,д}$ – допускаемая сила, с которой на обечайку может действовать опора, Н [40].

Все необходимые для проверки данного условия расчёты осуществляются в соответствии с источниками [24, 40].

5.8.1 Предварительно необходимо рассчитать максимальный вес аппарата, соответствующий условиям гидроиспытаний, когда аппарат и рубашка целиком заполнены водой.

Вес крышки:

$$G_{э.к.1} = g \cdot m_{э.к.} = 2.328 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.120)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Поскольку крышка идентична днищу, удваиваем данный вес:

$$G_э = G_{э.к.1} \cdot 2 = 4.656 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.2 Объём материала цилиндрической обечайки:

					ФЮРА	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$V_{\text{ц}} = l_{\text{ц}} \cdot H_{\text{ц}} \cdot s_{\text{ц}} = 0.19 \text{ м}^3 \quad (5.121)$$

5.8.3 Масса обечайки:

$$m_{\text{ц}} = V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 1.505 \times 10^3 \text{ кг} \quad (5.122)$$

5.8.4 Вес обечайки:

$$G_{\text{ц}} = m_{\text{ц}} \cdot g = 1.476 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.123)$$

5.8.5 Объем обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.121):

$$V_{\text{цр}} = l_{\text{цр}} \cdot H_{\text{цр}} \cdot s_{\text{цр}} = 0.198 \text{ м}^3$$

5.8.6 Масса обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.122):

$$m_{\text{цр}} = V_{\text{цр}} \cdot \rho_{\text{ст.р}} = 1.558 \times 10^3 \text{ кг}$$

5.8.7 Вес обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.123):

$$G_{\text{цр}} = m_{\text{цр}} \cdot g = 1.528 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.8.8 Вес днища рубашки по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{др}} = g \cdot m_{\text{др}} = 2.711 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.9 Вес фланцевого соединения по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{ф}} = m_{\text{ф}} \cdot g = 6.841 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.10 Вес привода и мешалки по аналогии с формулой (5.120):

$$G_{\text{п}} = (m_{\text{п}} + 2m_{\text{м}}) \cdot g = 5.378 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.8.11 Вес штуцеров и других вспомогательных устройств принимаем по [27] равным 10% от веса аппарата без учёта веса привода:

$$G_{\text{пр}} = 0.1 \cdot [G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + (G_{\text{э}})] = 4.425 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.124)$$

5.8.12 Общий вес пустого аппарата:

$$G_{\text{ап}} = G_{\text{пр}} + G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + (G_{\text{э}}) + G_{\text{п}} = 5.406 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.125)$$

5.8.13 Объем воды в рубашке:

$$V_{\text{руб}} = (V_1 - V_2) + (V_3 - V_4) \quad (5.126)$$

где V_1 – объем цилиндрической обечайки рубашки, м^3 ; V_2 – объем цилиндрической обечайки корпуса, м^3 ; V_3 – объем эллиптического днища рубашки, м^3 ; V_4 – объем эллиптического днища корпуса, м^3 .

					ФЮРА	Лист
						79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Объёмы цилиндрических сегментов, согласно [21], равны 11,90 и 10,629 м³ соответственно. Объёмы эллиптических сегментов, согласно [35], равны 1,07 и 0,862 м³ соответственно. Тогда:

$$V_{руб} = (11.90 - 10.629) + (1.07 - 0.862) = 1.479 \text{ м}^3$$

5.8.14 Объём воды в аппарате при гидравлическом испытании:

$$V_{воды} = V_{руб} + V_{кор} = 13.979 \text{ м}^3 \quad (5.127)$$

5.8.15 Вес воды в аппарате по аналогии с формулой (5.125):

$$G_{воды} = 13.979 \cdot 1 \times 10^3 \cdot 9.81 = 1.371 \times 10^5 \text{ Н}$$

5.8.16 Вес аппарат при гидравлическом испытании:

$$G_{п.ап} = G_{ап} + G_{воды} = 1.912 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.128)$$

5.8.17 Расположим аппарат в помещении подвешенным между этажами. Для этого в качестве опор можно использовать лапы. Примем количество лап равным четырём. Тогда на одну лапу придётся веса:

$$F_1 := \frac{G_{п.ап}}{4} = \frac{191191.85}{4} = 47797.963 \text{ Н} \quad (5.129)$$

В соответствии со стандартом [41] принимаем в качестве опорных устройств штампованные опорные лапы с допускаемой нагрузкой на одну лапу, равной 63000 Н. Параметры опоры, следующие [41]:

- расстояние между средними линиями рёбер опоры, мм, $g = 215$;
- высота опорной лапы, мм, $h_1 = 445$;
- ширина основной плиты опорной лапы, мм, $b_4 = 225$;
- длина подкладного листа, мм, $b_3 = 600$;
- ширина подкладного листа, мм, $b_2 = 360$;
- толщина подкладного листа, мм, $s_2 = 8$;
- длина опорной лапы, мм, $l_1 = 240$.

5.8.18 Осуществим проверку применимости расчётных формул [40]:

$$\frac{(s_{цп} - c)}{D_p} = 3.077 \times 10^{-3} \leq 0.05, \quad (5.130)$$

$$g = 215 \text{ мм} \geq 0.2 \cdot h_1 = 89 \text{ мм}, \quad (5.131)$$

$$0.04 \leq \frac{h_1}{D_p} = 0.228 \leq 0.5, \quad (5.132)$$

					ФЮРА	Лист
						80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$0.04 \leq \frac{b_4}{D_p} = 0.115 \leq 0.5, (5.133)$$

$$0.04 \leq \frac{b_3}{D_p} = 0.308 \leq 0.8, (5.134)$$

$$b_2 = 360 \geq 0.6 \cdot b_3 = 360, (5.135)$$

$$b_3 = 600 \leq 1.5 \cdot h_1 = 667.5, (5.136)$$

$$s_2 = 8 \geq s = 1 \text{ s} (5.137)$$

Поскольку все условия выполняются, формулы стандарта применимы для необходимого нам расчёта.

5.8.19 Расстояние между точкой приложения усилия и подкладным листом [30]:

$$e_1 = \frac{5}{6} \cdot l_1 = \frac{5}{6} \cdot 240 = 200 \text{ мм} (5.138)$$

5.8.20 Допускаемое усилие, с которым опора воздействует на обечайку:

$$F_1 \leq F_{1.д} = \frac{\sigma_{i.д} \cdot b_3 \cdot (s_{цр} - c)^2}{K_8 \cdot (e_1 + s_2)} (5.139)$$

где $\sigma_{i.д}$ – предельное напряжение изгиба, МПа; K_8 – коэффициент, учитывающий конструкцию опор [40].

5.8.21 Предельное напряжение изгиба:

$$\sigma_{i.д} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_{д.руб} (5.140)$$

где K_1 и K_2 – вспомогательные коэффициенты [40].

K_2 для условий гидроиспытания принимаем равным 1,05. K_1 рассчитывается по формуле:

$$K_1 = \frac{1 - v_2^2}{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right)^2 + (1 - v_2^2) \cdot v_1^2}} (5.141)$$

где v_1 – коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба; v_2 – коэффициент, учитывающий степень нагрузки общими мембранными напряжениями [40].

5.8.22 Для определения упомянутых в предыдущем пункте коэффициентов произведём расчёт следующих вспомогательных параметров [40]:

- общие мембранные напряжения:

					ФЮРА	Лист
						81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma'_m := \frac{p \cdot D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} = \frac{0.2 \cdot 1.95 \times 10^3}{2 \cdot (8 - 2)} = 32.5 \text{ МПа} \quad (5.142)$$

- расстояние между опорным узлом и ближайшим сварным швом более:

$$\sqrt{D_p \cdot s_{\text{цр}}} = 124.9 \text{ мм} \quad (5.143)$$

а потому позволено принять коэффициент прочности сварных швов φ , расположенных в области опорного узла, равным 1.

5.8.23 По рекомендации стандарта [40] принимаем v_1 равным 0,4. В то же время коэффициент v_2 [40]:

$$v_2 = \frac{\sigma'_m}{K_2 \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot \varphi} = 0.168 \quad (5.144)$$

Таким образом, K_1 по формуле (5.141):

$$K_1 = \frac{1 - v_2^2}{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + v_1 \cdot v_2\right)^2 + (1 - v_2^2) \cdot v_1^2}} = 1.01$$

Отсюда, по формуле (5.140):

$$\sigma_{\text{ид}} = 1.01 \cdot 1.25 \cdot 155 = 195.649 \text{ МПа}$$

5.8.24 Для определения коэффициента K_8 предварительно определяются следующие вспомогательные параметры [40]:

$$x = \ln \left[\frac{D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} \right] = 5.091 \text{ мм}, \quad (5.145)$$

$$y = \ln \left(\frac{h_1}{D_p} \right) = -1.478, \quad (5.146)$$

$$y_1 = \ln \left(\frac{b_3}{D_p} \right) = -1.179 \quad (5.147)$$

5.8.25 Коэффициент K_8 [40]:

$$K_8 = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp[(-49,919 - 39,119x - 107,01y_1 - 1,693x^2 - 11,920xy_1 - 39,276y_1^2 + \\ + 0,237x^3 + 1,608x^2y_1 + 2,761xy_1^2 - 3,854y_1^3)10^{-2}] \\ \exp[(-5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - 2,042y^2 + \\ + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3)10^{-2}], \end{array} \right\} = 0.242$$

					ФЮРА	Лист
						82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.8.26 Тогда по формуле (5.139):

$$F_{1.д} = \frac{195.649 \cdot 600 \cdot (8 - 2)^2}{0.242 \cdot (200 + 8)} = 8.394 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.8.27 Проверим выполнение условия прочности обечайки от воздействия опор (5.119):

$$F_1 = 4.78 \times 10^4 \text{ Н} \leq F_{1.д} = 8.394 \times 10^4 \text{ Н}$$

Условие выполняется. Можно сделать вывод, что при принятых опорных лапах надёжность конструкции обеспечена.

5.9 Расчёт вала для перемешивающего устройства реактора синтеза полипропилена

Название элемента – гладкий однопролётный вал аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 14.

Схема для расчёта вала представлена на рисунке 18:

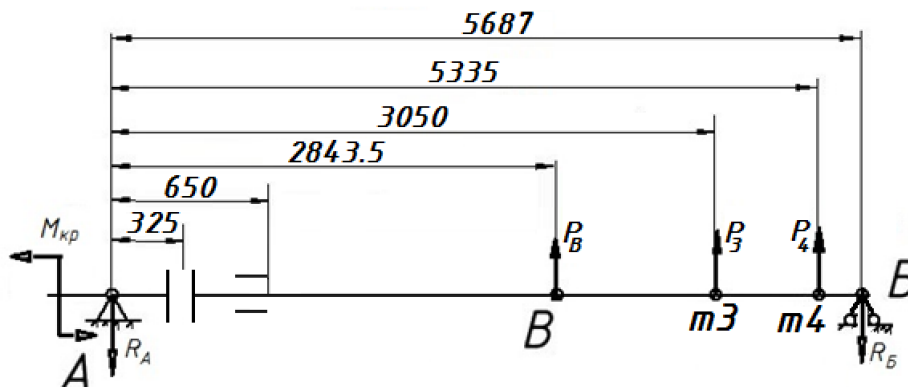


Рисунок 18 – Расчётная схема гладкого однопролётного вала

Исходные данные для расчёта:

- длина вала, мм, $L = 5687$;
- координата центра тяжести муфты, мм, $l_1 = 325$;
- координата центра тяжести уплотнения, мм, $l_2 = 520$;
- координата центра тяжести верхней мешалки, мм, $l_3 = 3050$;
- координата центра тяжести нижней мешалки, мм, $l_4 = 5335$;
- масса муфты, кг, $m_1 = 36$ [42];
- масса уплотнения, кг, $m_2 = 58$ [42];
- масса мешалок, кг, $m_3, m_4 = 5.11$ [24];
- модуль предельной упругости материала вала, Па, $E_b = 2 \cdot 10^{11}$ [39];
- плотность материала вала, кг/м³, $\rho_b = 7920$ [39];
- плотность перемешиваемой среды, кг/м³, $\rho_{ср} = 776,47$ (пункт 5.2);

					ФЮРА	Лист
						83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- диаметр аппарата, мм, $D = 1800$;
- диаметр мешалки, мм, $d_m = 560$ (пункт 3.2);
- число мешалок на валу, шт, $n_m = 2$ (пункт 3.2);
- мощность привода, кВт, $N_{пр} = 1.5$ (пункт 3.2);
- площадь лобового сопротивления внутреннего устройства, m^2 , $F = 2.4$.

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции вала по критериям виброустойчивости, жёсткости и прочности. Неравенства, выражающие эти критерии, имеют следующий вид:

- виброустойчивость

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} \leq 0.7 \quad (5.148)$$

где ω – угловая скорость, c^{-1} ; $\omega_{0к}$ – критическая угловая скорость, c^{-1} [43, 44];

- жёсткость

$$A_{zj} \leq A_{zj.д} \quad (5.149)$$

где A_{zj} – динамическое смещение оси вращения вала вследствие зазоров опор в опасном по жёсткости сечении, м; $A_{zj.д}$ – допускаемое смещение оси вращения вала в опасном по жёсткости сечении, м [19, 43];

- прочность

$$\sigma_{экр} \leq \sigma_d \quad (5.150)$$

где $\sigma_{экр}$ – эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа; σ_d – допускаемое напряжение в опасном по прочности сечении, МПа [19, 43].

5.9.1 Критическая угловая скорость однопролётного вала:

$$\omega_{0к} = \left(\frac{\alpha_1}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E \cdot J)}{m_i}} \quad (5.151)$$

где α_1 – первый корень частного уравнения; L – длина пролёта, м; J – момент инерции поперечного сечения вала, m^4 ; E – модуль упругости материала вала, Па; m_i – масса единицы длины вала, кг [44].

5.9.2 Относительная приведённая масса деталей на однопролётном валу:

$$m_{пр.отн} = \frac{m_{сум.пр}}{m_L \cdot L} \quad (5.152)$$

где $m_{сум.пр}$ – суммарная приведённая масса деталей на валу, кг;

m_L – линейная масса вала, кг/м [44].

					ФЮРА	Лист
						84
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.9.3 Линейная масса вала [44]:

$$m_L = \pi \cdot \frac{d_B^2}{4} \cdot \rho_B \quad (5.153)$$

Тогда:

$$m_L = \pi \cdot \left[\frac{\left(\frac{65}{1000} \right)^2}{4} \right] \cdot 7920 = 26.28 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

5.9.4 Суммарная масса деталей, закреплённых на однопролётном валу:

$$m_{\text{сум.пр}} = \sum_{i=1}^{n_j} m_{i.\text{пр}} \quad (5.154)$$

где n_i – число деталей в пролёте;

$m_{i.\text{пр}}$ – приведенная масса каждой i -й детали в пролёте, кг [44].

В пролёте закреплены: муфта, торцевое уплотнение и две мешалки. Произведём следующие действия:

- поместим муфту посередине между первой опорой и внешней стороной аппарата. Её фактическая координата l_1 будет равна 325 мм;
- для размещения торцевого уплотнения необходимо из расстояния от первой опоры до аппарата, равного 650 мм, вычесть половину высоты уплотнения, равного 260 мм. Таким образом, фактическая координата уплотнения l_2 будет равна 520 мм;
- размещение первой мешалки принимаем конструктивно равным 2400 мм от крышки аппарата. С учётом расстояния в 650 мм от крышки аппарата до верхней опоры первая мешалка будет иметь фактическую координату l_3 , равную 3050 мм;
- для определения координаты второй мешалки из общей высоты аппарата, равной 5180 мм, необходимо вычесть расстояние от мешалки до днища, равное 450 мм, и половину длины ступицы мешалки, равную 45 мм. С учётом расстояния в 650 мм от крышки аппарата до верхней опоры вторая мешалка будет иметь фактическую координату $l_4 = 5335$ мм.

5.9.5 Относительная координата детали в пролёте [44]:

$$l_{i.\text{отн}} = \frac{l_i}{L} \quad (5.155)$$

где l_i – фактическая координата i -ой детали в пролёте, мм.

Таким образом:

					ФЮРА	Лист
						85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$l_{1.отн} = \frac{l_1}{L} = 0.057$$

$$l_{2.отн} = \frac{l_2}{L} = 0.091$$

$$l_{3.отн} = \frac{l_3}{L} = 0.536$$

$$l_{4.отн} = \frac{l_4}{L} = 0.938$$

5.9.6 Приведённая масса детали в пролёте [44]:

$$m_{i.пр} = m_i \cdot y_{li}^2 \quad (5.156)$$

где m_i – фактическая масса i -ой детали в пролёте, кг, y_{li} – безразмерный динамический прогиб вала от воздействия i -ой детали в пролёте.

Безразмерные прогибы вала для муфты, уплотнения и мешалок определяются по рисунку 19 [19].

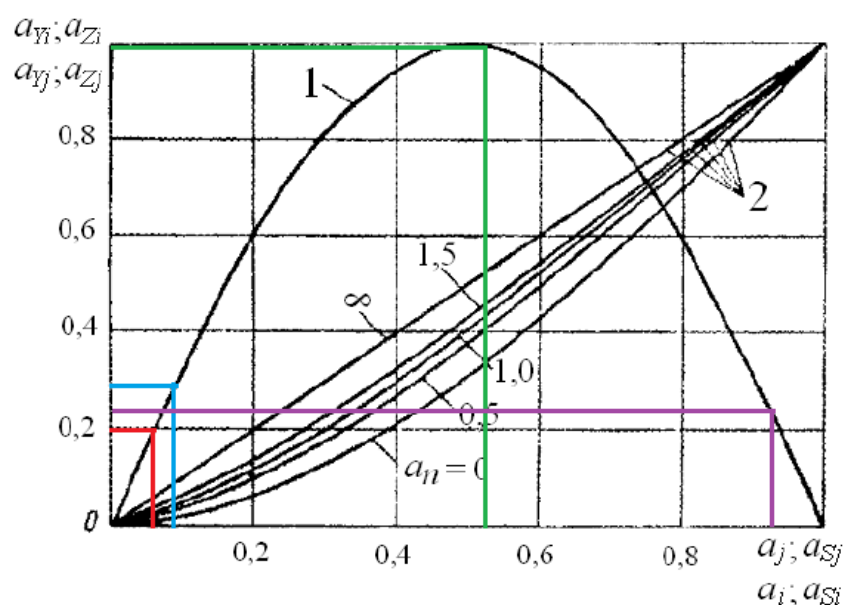


Рисунок 19 – Безразмерные динамические прогибы: 1 – для однопролётного вала, 2 – для консольных валов [19].

Таким образом, безразмерные динамические прогибы $y_{1.1}$, $y_{1.2}$, $y_{1.3}$ и $y_{1.4}$ равны 0.2, 0.3, 0.99 и 0.24 соответственно.

Массы муфты, уплотнения и мешалок берём по [42], а именно масса муфты m_1 , уплотнения m_2 и мешалок m_3 и m_4 равны соответственно 36, 58, 5.11 и 5.11 кг.

5.9.7 Приведённая масса деталей на валу по формуле (5.154):

$$m_{сум.пр} = m_1 \cdot y_{1.1}^2 + m_2 \cdot y_{1.2}^2 + m_3 \cdot y_{1.3}^2 + m_4 \cdot y_{1.4}^2 = 11.963 \text{ кг}$$

					ФЮРА	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.9.8 Расчётный диаметр вала [44]:

$$d_p \geq \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} \quad (5.157)$$

где A_1 и A_2 – члены уравнения, рассчитываемые по следующим формулам [44]:

$$A_1 = q \cdot f \cdot L^2 \quad (5.158)$$

$$A_2 = \frac{8 \cdot m_{\text{сум.пр}} \cdot f \cdot L}{\pi \cdot \rho_B} \quad (5.159)$$

где q – коэффициент приведения однопролётного вала, равный 0.5 [44]; f – безразмерный коэффициент; ρ_B – плотность материала вала, кг/м³.

5.9.9 Безразмерный коэффициент [44]:

$$f = \frac{8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L^2}{\xi^2 \cdot \eta \cdot E} \quad (5.160)$$

где ω – угловая скорость вращения вала, с⁻¹; ξ – коэффициент из условия виброустойчивости для жёсткого вала, работающего в системе жидкость-жидкость (равный 0.7 [14]); η – коэффициент, учитывающий условия закрепления вала (равный 48 [44]); E – модуль упругости материала вала, Па.

Произведём дополнительные расчёты:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 18.85 \text{ с}^{-1} \quad (5.161)$$

Тогда:

$$f = \frac{8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L^2}{\xi^2 \cdot \eta \cdot E_B} = 1.54 \times 10^{-4}$$

5.9.10 Таким образом, по формулам (5.158) и (5.159):

$$A_1 = q \cdot f \cdot L^2 = 2.49 \times 10^{-3}$$

$$A_2 = \frac{8 \cdot m_{\text{сум.пр}} \cdot f \cdot L}{\pi \cdot \rho_B} = 3.368 \times 10^{-6}$$

Отсюда по формуле (5.157):

$$d_p = \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = 0.065 \text{ м}$$

5.9.11 Момент инерции сечения вала [44]:

$$J = \frac{\pi \cdot d_p^4}{64} = 8.762 \times 10^{-7} \text{ м}^4 \quad (5.162)$$

					ФЮРА	Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.9.12 Относительная приведённая масса вала [44]:

$$m_{\text{пр.отн}} = \frac{m_{\text{сум.пр}}}{m_L \cdot L} = 0.08 \quad (5.163)$$

5.9.13 Первый корень частотного уравнения α_1 определяется по аппроксимирующей формуле [19]:

$$\alpha_1 = 3.146 - 1.3426 \cdot m_{\text{пр.отн}} + 0.836 \cdot m_{\text{пр.отн}}^2 - 0.34086 \cdot m_{\text{пр.отн}}^3 + 0.0638 \cdot m_{\text{пр.отн}}^4 = 3.544 \quad (5.164)$$

5.9.14 Критическая угловая скорость по формуле (5.151):

$$\omega_{0к} = \left(\frac{\alpha_1}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E_B \cdot J)}{m_L}} = 31.712 \quad \text{с}^{-1}$$

5.9.15 Осуществим проверку условия виброустойчивости вала:

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} = \frac{18.8}{31.7} = 0.593 < 0.7$$

Неравенство выполняется. В связи с этим можно утверждать, что надёжность конструкции по виброустойчивости обеспечена.

Проведем проверку жесткости вала в опасных сечениях (в местах крепления торцевого уплотнения, мешалок и в точке приведения В).

5.9.16 Эксцентриситет массы мешалки [34]:

$$e_M = \frac{10^{-3}}{\sqrt{\omega}} = 2.306 \times 10^{-4} \quad \text{м} \quad (5.165)$$

5.9.17 Приведённые эксцентриситеты масс мешалок [34]:

$$e_{\text{м.пр.3}} = \frac{e_M}{y_{1.3}} = 2.33 \times 10^{-4} \quad \text{м} \quad (5.166)$$

$$e_{\text{м.пр.4}} = \frac{e_M}{y_{1.4}} = 9.61 \times 10^{-4} \quad \text{м}$$

5.9.18 Приведённая масса вала [34]:

$$m_{\text{в.пр}} = q \cdot (m_L \cdot L) = 74.73 \quad \text{кг} \quad (5.167)$$

5.9.19 Смещение оси вала за счёт зазоров в опорах [34]:

$$\Delta_{z,j} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_i}{L} + \Delta_A \quad (5.168)$$

					ФЮРА	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где Δ_A и Δ_B – радиальные зазоры в подшипниках, принимаемые для диаметра вала 65 мм равными $30 \cdot 10^{-6}$ м [34].

Тогда для мест крепления торцевого уплотнения и мешалок:

$$\Delta_{z.2} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_2}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\Delta_{z.3} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_3}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\Delta_{z.4} = \frac{(\Delta_B - \Delta_A) \cdot l_4}{L} + \Delta_A = 3 \times 10^{-5} \text{ м}$$

5.9.20 Смещение оси вращения за счёт начальной изогнутости вала [34]:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_B \cdot y_{\text{н}} \quad (5.169)$$

где ε_B – начальная изогнутость вала в точке приведения, м.

Поскольку отношение длины вала к его диаметру составляет:

$$\frac{L}{d_B} = 87.492$$

примем по пособию [34] значение начальной изогнутости равным $0.06 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда для торцевого уплотнения и мешалок:

$$\varepsilon_{z.2} = \varepsilon_B \cdot y_{l.2} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\varepsilon_{z.3} = \varepsilon_B \cdot y_{l.3} = 5.94 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\varepsilon_{z.4} = \varepsilon_B \cdot y_{l.4} = 1.44 \times 10^{-5} \text{ м}$$

5.9.21 Смещение оси однопролётного вала в точке приведения [34]:

$$\Delta_B = \frac{(\Delta_A + \Delta_B)}{2} = 3 \times 10^{-5} \text{ м} \quad (5.170)$$

5.9.22 Приведённый эксцентриситет массы однопролётного вала с трёхлопастной мешалкой [34]:

$$e_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{\text{пр.}i} \cdot e_{\text{пр.}i})}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \varepsilon_B \quad (5.171)$$

где $m_{\text{пр.}i}$ – приведенная масса элемента, кг; $e_{\text{пр.}i}$ – эксцентриситет элемента, м; $m_{\text{сум.пр}}$ – приведенная масса элементов на валу, кг; $m_{\text{в.пр}}$ – приведенная масса вала, кг.

5.9.23 Приведённая масса мешалки [34]:

					ФЮРА	Лист
						89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$m_{\text{пр.3}} = m_3 \cdot y_{1.3}^2 = 5.008 \text{ кг}$$

Тогда по формуле (5.171):

$$e_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр.3}} \cdot e_{\text{м.пр.3}} + m_{\text{пр.4}} \cdot e_{\text{м.пр.4}}}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \varepsilon_B = 1.067 \times 10^{-4} \text{ м}$$

поскольку в аппарате установлены две мешалки.

5.9.24 Динамический прогиб вала в точке приведения В [34]:

$$y_B = \frac{e_{\text{пр}}}{\frac{\omega_{0\text{к}}}{\omega} - 1} = 1.554 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.172)$$

5.9.25 Динамическое смещение центра тяжести вала в местах крепления торцевого уплотнения, мешалок и точке приведения В [34]:

$$A_{z.\text{уп}} = y_B \cdot y_{1.2} + \Delta_{z.2} + \varepsilon_{z.2} = 9.462 \times 10^{-5} \text{ м}, \quad (5.173)$$

$$A_{z.\text{м.3}} = y_B \cdot y_{1.3} + \Delta_{z.3} + \varepsilon_{z.3} + e_{\text{м.пр.3}} = 4.762 \times 10^{-4} \text{ м}, \quad (5.174)$$

$$A_{z.\text{м.4}} = y_B \cdot y_{1.4} + \Delta_{z.4} + \varepsilon_{z.4} + e_{\text{м.пр.4}} = 1.043 \times 10^{-3} \text{ м}, \quad (5.175)$$

$$A_B = y_B + \varepsilon_B + \Delta_B = 2.454 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.176)$$

5.9.26 Поскольку в аппарате расположены дополнительные внутренние устройства, а именно отражающие перегородки, необходимо произвести расчёты, учитывающие воздействие поперечной гидродинамической силы на вал аппарата.

Критерий мощности для аппарата с внутренними устройствами КН был рассчитан в рамках гидродинамического расчёта и равен 0,52.

Критерий мощности для аппарата с перегородками и трёхлопастными мешалками КНП принимается по [19] равным 3.4.

5.9.27 Коэффициент сопротивления мешалки [19]:

$$\xi_{\text{м}} = \frac{K_{\text{НП}}}{0.7} = 4.857 \quad (5.177)$$

5.9.28 Безразмерный комплекс, характеризующий гидродинамический режим потока в аппарате [19]:

$$\Phi = \frac{0.36 \cdot \Gamma_D}{\xi_{\text{м}} \cdot n_{\text{м}} \cdot Re_{\text{ц}}^{0.25}} = 3.903 \times 10^{-3} \quad (5.178)$$

где Γ_D – отношение диаметров аппарата и мешалки, $n_{\text{м}}$ – число мешалок, $Re_{\text{ц}}$ – критерий Рейнольдса.

					ФЮРА	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.9.29 Гидродинамический параметр ψ_0 определяется по аппроксимирующей формуле при $x = \lg(\Phi)$ [19]:

$$\psi_0 = 1.913 + 0.440 \cdot x - 0.456 \cdot x^2 - 0.0971 \cdot x^3 + 0.00125 \cdot x^4 = -0.393 \quad (5.179)$$

5.9.30 При площади лобового сопротивления F , равной $2,4 \text{ м}^2$, имеем значение коэффициента лобового сопротивления [19]:

$$c_F = \frac{2.5 \cdot F}{D^2} = 1.852 \quad (5.180)$$

5.9.31 Поправочный коэффициент α_F [19]:

$$\alpha_F = 1.999 + 3.748 \cdot c_F - 6.191 \cdot c_F^2 + 5.219 c_F^3 - 1.777 \cdot c_F^4 = -0.046 \quad (5.181)$$

5.9.32 Коэффициент увеличения мощности [19]:

$$c_N = \alpha_F \cdot \left(\frac{K_{NП}}{K_N - 1} \right) + 1 = 1.324 \quad (5.182)$$

5.9.33 По таблице из [19] выбираем аппроксимирующие коэффициенты ближайшего c_N . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны соответственно 0.216, 0.1918 и 0.04028.

Относительное смещение центра эпюры окружной скорости от оси мешалки [19]:

$$S_V = c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0^2 = 0.125 \quad (5.183)$$

5.9.34 По таблице из [19] выбираем аппроксимирующие коэффициенты ближайшего S_V . Коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 равны соответственно 0.0048, -0.0168 и -0.0023 .

Безразмерная поперечная гидродинамическая сила [19]:

$$\psi_Q = c_0 + c_1 \cdot \psi_0 + c_2 \cdot \psi_0^2 = 0.012 \quad (5.184)$$

5.9.35 Поперечная гидродинамическая сила, действующая на мешалку [19]:

$$Q_i = 0.015 \cdot k_Q \cdot \psi_Q \cdot \xi_M \cdot \rho_{ср} \cdot \omega^2 \cdot d_M^4 \quad (5.185)$$

где k_Q – коэффициент, учитывающий тип мешалки, равный для трёхлопастной мешалки 0.96; $\rho_{ср}$ – плотность среды в аппарате, кг/м^3 ; d_M – диаметр мешалки, м.

Тогда:

$$Q_i = 0.015 \cdot k_Q \cdot \psi_Q \cdot \xi_M \cdot \rho_{ср} \cdot \omega^2 \cdot d_M^4 = 23.242 \text{ Н}$$

5.9.36 Приведённая гидродинамическая сила [19]:

$$Q_{iB} = Q_i \cdot y_{ii} \quad (5.186)$$

Тогда:

					ФЮРА	Лист
						91
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_{3B} = Q_i \cdot y_{1.3} = 23.01 \text{ Н},$$

$$Q_{4B} = Q_i \cdot y_{1.4} = 5.578 \text{ Н}$$

5.9.37 Суммарная приведённая гидродинамическая сила [19]:

$$Q_B = Q_{3B} + Q_{4B} = 28.588 \text{ Н} \quad (5.187)$$

5.9.38 Динамический прогиб вала в точке приведения В от Q_B [19]:

$$y_{BQ} = \frac{Q_B \cdot L^3}{48 \cdot E_B \cdot J} = 6.251 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.188)$$

5.9.39 Динамические смещения центра тяжести вала в местах крепления мешалок, уплотнения и в точке приведения с учётом поперечной гидродинамической силы:

$$A_{Q3} = A_{z.m.3} + y_{BQ} \cdot y_{1.3} = 1.095 \times 10^{-3} \text{ м}, \quad (5.189)$$

$$A_{Q4} = A_{z.m.4} + y_{BQ} \cdot y_{1.4} = 1.193 \times 10^{-3} \text{ м},$$

$$A_{Q.уп} = A_{z.уп} + y_{BQ} \cdot y_{1.2} = 1.821 \times 10^{-4} \text{ м},$$

$$A_{BQ} = A_B + y_{BQ} = 8.705 \times 10^{-4} \text{ м}$$

5.9.40 В соответствии с рекомендациями пособия [34] опасным по жёсткости сечением признаётся торцевое уплотнение, для которого допускаемое значение динамического смещения вала составляет $0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Осуществим проверку условия надёжности вала по критерию жёсткости в месте установки торцевого уплотнения:

$$A_{Q.уп} = 1.821 \times 10^{-4} \text{ м} < A_{z.уп.д} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Неравенство выполняется. Таким образом, можно сделать вывод, что надёжность торцевого уплотнения по жёсткости обеспечена.

Для остальных сечений значение динамического смещения вала примем по существующим нормам допускаемых прогибов поперечных сечений валов [http://www.metiz-krepej.ru/val/raschet_na_zhestkost.html], согласно которым максимальный прогиб $[y] \leq (0,0002...0,0003) \cdot L$, где L - расстояние между опорами. При $L = 5687 \text{ мм}$ этот допускаемый прогиб лежит в пределах 1.14 до 1.71 мм. Из этого видно, что и прогибы вала в остальных сечениях также удовлетворяют условию жёсткости

Проведем далее проверку прочности вала в наиболее нагруженном месте.

5.9.41 Сосредоточенная сила, действующая на мешалку [19]:

$$P_i = Q_i + m_i \cdot \omega^2 \cdot A_{z.i} \quad (5.190)$$

					ФЮРА	Лист
						92
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где Q_i – поперечная гидродинамическая сила, действующая на мешалку, Н; m_i – масса мешалки, кг; ω – угловая скорость вращения мешалки, c^{-1} ; $A_{z,i}$ – динамическое смещение оси вала от вращения мешалки, м.

Формула выглядит подобным образом, поскольку в аппарате размещены дополнительные внутренние устройства, а именно – отражательные перегородки. Тогда:

$$P_3 = Q_i + m_3 \cdot \omega^2 \cdot A_{z.m.3} = 24.102 \text{ Н},$$

$$P_4 = Q_i + m_4 \cdot \omega^2 \cdot A_{z.m.4} = 25.125 \text{ Н}$$

5.9.42 Приведённая центробежная сила, действующая на вал в точке приведения В, рассчитывается по аналогии с предыдущей формулой [19]:

$$P_B = m_{B.пр} \cdot \omega^2 \cdot A_{BQ} = 22.991 \text{ Н}$$

5.9.43 В соответствии с рисунком, расположенным в начале подраздела, построим формулы реакций опор А и Б и найдём их значения:

$$R_A = \frac{P_B \cdot \frac{L}{2} + P_3 \cdot (L - l_3) + P_4 \cdot (L - l_4)}{L} = 24.227 \text{ Н}, \quad (5.191)$$

$$R_B = \frac{P_B \cdot \frac{L}{2} + P_3 \cdot l_3 + P_4 \cdot l_4}{L} = 47.992 \text{ Н} \quad (5.192)$$

5.9.44 Воспользовавшись программами ЭВМ, предназначенными для построения эпюр поперечных сил и изгибающих моментов, действующих на балку [45], получим эпюры, отражённые на рисунке 20.

Из рисунка 20 видно, что наиболее опасным по прочности сечением является точка крепления верхней мешалки, в которой действует изгибающий момент M_n , равный 69,14 Н*м.

5.9.45 Крутящий момент, передаваемый выходным валом [34]:

$$M_K = \frac{N_{пр} \cdot 1000}{\omega} = 79.787 \text{ Н·м} \quad (5.193)$$

где $N_{пр}$ – мощность привода, кВт.

					ФЮРА	Лист
						93
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

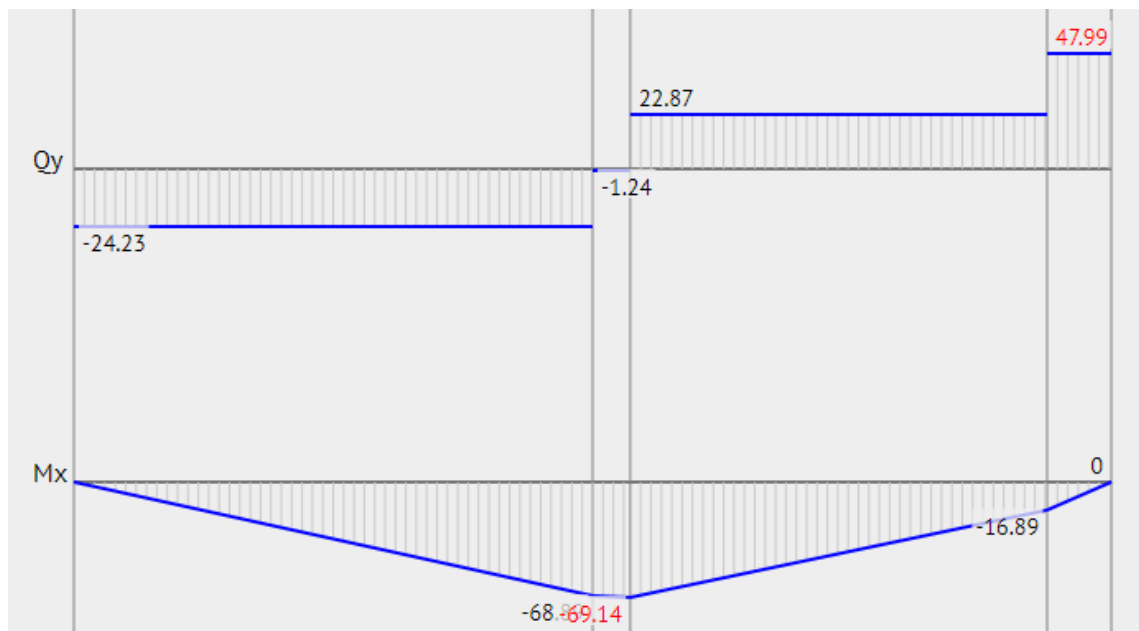


Рисунок 20 – Эпюры поперечных сил и изгибающих моментов на однопролётном валу

5.9.46 Момент сопротивления вала в опасном по прочности сечении [34]:

$$W_z = \frac{\pi \cdot d_p^3}{32} = 2.696 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.194)$$

5.9.47 Эквивалентное напряжение в опасном сечении [34]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{к}}^2}}{W_z \cdot 10^6} = 3.916 \text{ МПа} \quad (5.194)$$

где $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент в опасном сечении, Н*м.

5.9.48 Допускаемое напряжение в опасном сечении [34]:

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\epsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zlj} \cdot n_{\text{min}}} \quad (5.195)$$

где ϵ_M – коэффициент, принимаемый равным 0,65 для легированной стали [34]; σ_1 – предел выносливости материала вала, равный 295 МПа в соответствии с пособием [34]; $K_{\sigma.zlj}$ – коэффициент, учитывающий шпоночные соединения и принимаемый равным 1.34, поскольку в местах соединения вала с мешалкой имеются шпоночные канавки, выполненные торцевой фрезой [34]; n_{min} – коэффициент, ориентировочно принимаемый равным 2 [34].

Тогда:

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\epsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zlj} \cdot n_{\text{min}}} = 71.549 \text{ МПа}$$

5.9.49 Произведём проверку выполнения условия прочности:

					ФЮРА	Лист
						94
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{\text{экв}} = 3.916 \text{ МПа} < \sigma_{\text{д}} = 71.549 \text{ МПа}$$

Неравенство выполняется, в связи с чем можно заключить, что надёжность конструкции вала по механической прочности обеспечена.

5.9.50 Резюмируем произведённый расчёт:

- надёжность вала по условию виброустойчивости – обеспечена (пункт 5.9.15);
- надёжность вала по условию жёсткости – обеспечена (пункт 5.10.40);
- выполнение условия механической прочности вала – обеспечено (пункт 5.9.49).

Таким образом, делаем вывод, что надёжность конструкции вала обеспечена по всем необходимым критериям.

5.10 Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза полипропилена

Названия элементов – торцевое уплотнение, отверстия для технологических штуцеров в аппарате для производства полипропилена. Обозначение на расчётной модели – 4, А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З.

Схема расположения штуцеров на поверхности аппарата наиболее полно дана в расчётной модели.

Расчётная схема укрепления отверстий представлена на рисунке 21.

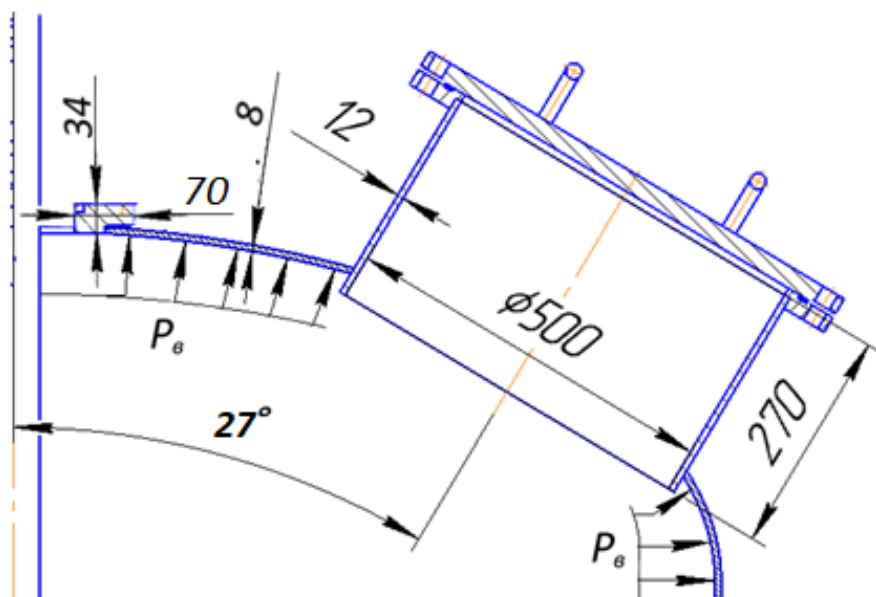


Рисунок 21 – Расчётная схема укрепления отверстий для торцевого уплотнения и люка-лаза
рв – внутреннее избыточное давление в аппарате при рабочих условиях или пробное давление при
условиях гидроиспытания, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- внутреннее рабочее давление, МПа, $p_{\text{раб}} = 0,7$;
- пробное давление в рубашке при гидравлическом испытании, МПа, $p_{\text{и.руб}} = 0,2$ (пункт 5.3);

					ФЮРА	Лист
						95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- избыточное давление на крышку и днище корпуса, МПа, $p_n = 0,729$ МПа (пункт 5.1);
- пробное давление в корпусе при гидравлическом испытании, МПа, $p_n = 1,282$ МПа (пункт 5.1);
- исполнительная толщина стенки обечайки корпуса, днища и крышки, мм, $s = 8$ (пункты 5.1 и 5.2);
- исполнительная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм, $s_{руб} = 8$ (пункт 5.3);
- расчётная толщина стенки днища и крышки, мм $s_{1p} = 5,3$ (пункт 5.2);
- расчётная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм, $s_{p,руб} = 1,258$ (пункт 5.3);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при рабочих условиях, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при условиях гидравлического испытания, МПа, $\sigma_{d,20} = 218$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]);

Геометрические параметры всех штуцеров указаны в таблице 3 настоящей работы.

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции отверстий по критерию прочности, а также проверка взаимного влияния отверстий поэтому же критерию. Условие укрепления одиночного отверстия:

$$l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq (5.196) \\ \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p$$

где l_{1p} , l_{2p} , l_{3p} , l_p – расчётные длины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; s_1 , s_2 , s_3 , s – исполнительные толщины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; s_{1p} , s_p – расчётные толщины внутренней части штуцера и зоны укрепления вокруг отверстия, мм; c_s , c_{s1} , c – прибавки на различные виды разрушений для штуцеров, укрепляющих элементов и зоны укрепления; d_p – расчётный диаметр отверстия, мм; d_{op} – расчётный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления, χ_1 , χ_2 , χ_3 – отношения допускаемых напряжений материалов обечайки и штуцера [46].

Условие прочности для одиночного и взаимовлияющих отверстий:

$$p \leq p_d \quad (5.197)$$

p – расчётное внутреннее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими отверстиями, МПа; p_d – допускаемое внутреннее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими отверстиями [46].

5.10.1 Расчётные диаметры укрепляемых элементов для штуцеров, расположенных нормально к поверхности обечайки и смещённых штуцеров на эллиптическом днище:

					ФЮРА	Лист
						96
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$D_p = D, (5.198)$$

$$D_p = 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^2} (5.199)$$

где x – расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм [46].

Поскольку исполнительные и расчётные толщины укрепляемых элементов уже определены в пунктах работы с 5.1 по 5.3, необходимо рассчитать для каждого из отверстий максимальный диаметр, не требующий дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки укрепляемого элемента:

$$d_o = 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} (5.200)$$

где s – исполнительная толщина укрепляемого элемента, мм; s_p – расчётная толщина укрепляемого элемента [46].

Все имеющиеся отверстия в данный момент рассматриваются как одиночные.

Поскольку в данном случае мы имеем дело с большим количеством однотипных расчётов, структурируем их в таблицу 6, воспользовавшись упомянутыми сверху формулами.

Таблица 6 – Расчёт диаметров отверстий, не требующих дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда.

Обозначение	D_y по [28], мм	D , мм	x , мм	D_p , мм	s , мм	s_p , мм	d_o , мм
А	40	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Б	32	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
В	20	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Г	50	1950		1950	8	1,259	857,91
Д	50	1950	300	3759	8	1,258	1192,3
Е	40	1800	0	3600	8	5,3	97,61
Ж	25	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
З	25	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678
Л	500	1800	525	3106,8	8	5,3	90,678

Как видно из приведённой выше таблицы, необходимо проверить условие укрепления одиночного отверстия для люка-лаза.

5.10.2 Расчётный диаметр люка-лаза [46]:

					ФЮРА	Лист
						97
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$d_{p.Л} = \frac{d_{Л} + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{p.Л}}\right)^2}} = 535.511 \text{ мм} \quad (5.201)$$

где $d_{Л}$ – принятый исполнительный диаметр отверстия, равный 500 мм.

5.10.3 Расчётный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления [46]:

$$d_{o.p.Л} = 0.4 \cdot \sqrt{D_{p.Л} \cdot (s - c)} = 54.614 \text{ мм} \quad (5.202)$$

5.10.4 Расчётная длина зоны укрепления [46]:

$$l_{p.Л} = \sqrt{D_{p.Л} \cdot (s - c)} = 193.084 \text{ мм} \quad (5.203)$$

5.10.5 Проверим, соблюдается ли условие укрепления одиночных отверстий для люка лаза при наличии штуцера без укрепляющего кольца. Люк-лаз вварен внутрь аппарата на длину $l_{з.л} = 5$ мм, выдаётся на $l_{1.л} = 257$ мм от поверхности эллиптической крышки. Толщина штуцера под люк-лаз постоянна и равна 12 мм. Поскольку штуцера изготавливаются из той же стали 12Х18Н10Т, что и корпусные элементы, все соотношения допускаемых напряжений равны 1. Коэффициенты прочности сварных швов также принимаются равными 1. Прибавку на коррозию ввиду единства среды для штуцеров примем также единой и равной 2 мм. Тогда:

$$\begin{aligned} l_{1.л} \cdot s_{1.л} \cdot \chi_1 + l_{з.л} \cdot s_{з.л} \cdot \chi_3 = \\ = 3.144 \cdot 10^3 \text{ мм} \geq 0.5 \cdot (d_{p.Л} - d_{o.p.Л}) \cdot s_p = 1.276 \cdot 10^3 \text{ мм} \end{aligned}$$

Условие укрепления отверстия под люк-лаз штуцером с условным проходом 500 мм выполняется.

5.10.6 Шесть штуцеров различного диаметра расположены на контуре окружности радиусом $x = 525$ мм вокруг отверстия под торцевое уплотнение, равное 235 мм. Минимальное расстояние между соседними штуцерами, которые можно считать одиночными [46]:

$$b = \sqrt{D_p \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 273.071 \text{ мм} \quad (5.204)$$

При расчётном диаметре для торцевого уплотнения, равном 3600 мм, минимальное расстояние между торцевым уплотнением и штуцером, находящимся на окружности, по аналогии с формулой (5.204):

$$b_1 = \sqrt{D_{p.y} \cdot (s - c)} + \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 283.505 \text{ мм}$$

					ФЮРА	Лист
						98
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Как видно из модели, приняты такие конструктивные решения, при которых только одна пара отверстий на крышке вступает во взаимное влияние, а именно – люк-лаз и отверстие под торцевое уплотнение. Произведём их проверку по условию прочности.

5.10.7 Коэффициент понижения прочности для одиночного отверстия [46]:

где K_1 – коэффициент, принимаемый для эллиптических крышек равным 2; K_3 – коэффициент, рассчитываемый по формуле [46]:

$$V_1 = \min \left[1, \frac{1 + \frac{l_{1.Л} \cdot s_{1.Л} \cdot \chi_1 + l_{3.Л} \cdot s_{3.Л} \cdot \chi_3 + l_{2.У} \cdot s_{2.У} \cdot \chi_2}{b_{УЛ} \cdot s}}{K_3 \cdot \left(0.8 + \frac{d_{У} + d_{Л}}{2 \cdot b_{УЛ}} \right) + K_1 \cdot \left(\frac{d_{У}}{D_{р.У}} \cdot \frac{\phi}{\phi_{У}} \cdot \frac{l_{1.У}}{b_{УЛ}} + \frac{d_{Л}}{D_{р.Л}} \cdot \frac{\phi}{\phi_{Л}} \cdot \frac{l_{1.Л}}{b_{УЛ}} \right)} \right] = 1 \quad (5.205)$$

где β – угол, определяющий положение штуцера на крышке и конструктивно принятый равным 30° .

5.10.7 Допускаемое давление для рабочих условий и условий испытаний [46]:

$$p_d = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{0.5 \cdot (D_{р.У} + D_{р.Л}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 1.215 \text{ МПа} \quad (5.207)$$

$$p_{д.и} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{0.5 \cdot (D_{р.У} + D_{р.Л}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2.272 \text{ МПа}$$

5.10.8 Проверим выполнение условие прочности одиночных отверстий:

$$p = 0.729 \text{ МПа} < p_d = 1.215 \text{ МПа}$$

$$p = 1.282 \text{ МПа} < p_{д.и} = 2.272 \text{ МПа}$$

Условие прочности отверстия под люк-лаз выполняется как при рабочих условиях, так и при условиях испытания. Следовательно, принятый штуцер люка-лаза с условным проходом 500 мм, толщиной стенки 12 мм и длиной 270 мм обеспечивает надёжность конструкции.

5.11 Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой

Названия элементов – гладкий однопролётный вал аппарата, трёхлопастные мешалки. Номера позиций на расчётной модели – 6 и 14.

Схема для расчёта шпоночного соединения представлена на рисунке 22.

					ФЮРА	Лист
						99
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

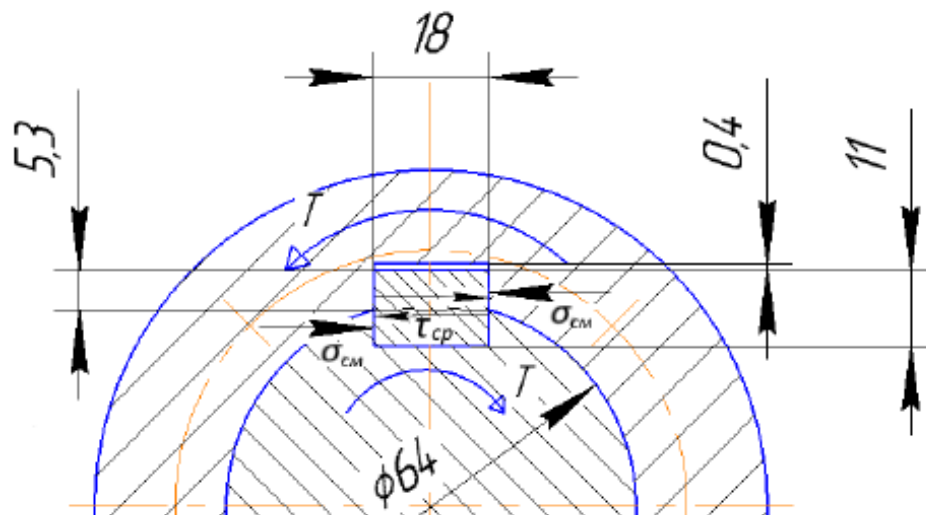


Рисунок 22 – Расчётная схема шпоночного соединения однопролётного вала с трёхлопастной мешалкой

T – крутящий момент на валу, Н*м; $\sigma_{см}$ – напряжение смятия шпонки, МПа;
 $\tau_{ср}$ – напряжение шпонки на срез, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- крутящий момент на валу, Н*м, $T = 79,787$ (пункт 5.10);
- диаметр вала, мм, $d = 65$ (пункт 3.2);
- ширина шпонки, мм, $b = 18$ [47];
- рабочая длина шпонки, мм, $l_p = 45$ [47];
- справочный размер шпонки для расчёта на смятие, мм, $K = 4$ [47];
- допускаемое напряжение стали 12X18H10T при работе шпоночного соединения, МПа, $\sigma_d = 155$ (таблица 4 настоящей работы по данным стандарта [31]).

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции шпоночного соединения по прочности на смятие и срез. Условия прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{см} \leq \sigma_{д.см} \quad (5.208)$$

$$\tau_c \leq \tau_{д.с} \quad (5.209)$$

где $\sigma_{см}$ – расчётное значение напряжения шпонки на смятие, МПа; τ_c – расчётное значение напряжения шпонки на срез, МПа [49].

Все вычисления производятся в соответствии с пособием [49]:

5.11.1 Для соединения вала с мешалкой принята призматическая шпонка по стандарту [47]. Расчётное напряжение на смятие [49]:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l_p \cdot K} = 6.819 \text{ МПа} \quad (5.210)$$

5.11.2 Расчётное напряжение на срез [49]:

					ФЮРА	Лист
						100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\tau_c = \frac{2 \cdot T}{d l_p \cdot b} = 1.515 \text{ МПа} \quad (5.211)$$

5.11.3 Поскольку шпоночное соединение будет контактировать с агрессивной средой в аппарате, необходимо изготавливать шпонки из той же стали 12Х18Н10Т, что и основные детали реактора. В соответствии с рекомендациями [49] допускаемые напряжения на смятие и срез принимаются как:

$$\sigma_{д.см} = (2...2.5) \cdot \sigma_d \quad (5.212)$$

$$\tau_{д.с} = (0.7...0.8) \cdot \sigma_d \quad (5.213)$$

То есть:

$$\sigma_{д.см} = 2 \cdot \sigma_d = 310 \text{ МПа},$$

$$\tau_{д.с} = 0.7 \cdot \sigma_d = 108.5 \text{ МПа}$$

5.11.4 Произведём проверку выполнения условий прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{см} = 6.819 \text{ МПа} < \sigma_{д.см} = 310 \text{ МПа}$$

$$\tau_c = 1.515 \text{ МПа} < \tau_{д.с} = 108.5 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются. Делаем вывод, что принятая призматическая шпонка с шириной 18 мм и рабочей длиной 45 мм обеспечивает надёжность конструкции соединения.

					ФЮРА	Лист
						101
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

6 Поверочный расчёт реактора синтеза полипропилена

При поверочном расчёте осуществляется оценка надёжности всей конструкции аппарата во время его работы. Рассмотрим некоторые нагрузки, для которых необходим поверочный расчёт:

- химический реактор не испытывает в процессе работы дополнительных температурных деформаций, которые не были бы учтены в разделах с 2 по 5. В конструкции реактора нет деформирующихся под действием температуры деталей, которые были бы жёстко закреплены с двух сторон, как это происходит в теплообменных аппаратах;
- опорные нагрузки для реактора синтеза полипропилена были рассчитаны в пункте 5.8 настоящей работы, дополнительных опорных нагрузок реактор не испытывает;
- поскольку в согласии с пунктом 3.5 настоящей работы было принято расположить реактор в перекрытии между этажами цеха, нет необходимости производить его расчёт на ветровую или снеговую нагрузку;
- предполагается осуществление установки и ведение реактора в эксплуатацию в Томской области либо ближайших к ней областях. Эти области не подвержены значительному воздействию сейсмической активности, а потому нет необходимости в проведении данного поверочного расчёта.

Таким образом, можно сделать вывод, что в дополнительных поверочных расчётах химического реактора для производства полипропилена нет необходимости.

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Поверочный расчет реактора синтеза пропилена</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>					102	
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>				ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Консульт.</i>								
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

7 Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена

В соответствии с произведёнными расчётами были приняты следующие конструктивные решения:

- аппарат – химический реактор для получения полипропилена;
- положение аппарата – вертикальное;
- тип аппарата – с механическим перемешивающим устройством;
- число мешалок – две;
- тип мешалки – трёхлопастная;
- диаметр мешалки – 560 мм;
- тип привода – I с концевой опорой;
- мощность привода – 1,5 кВт;
- тип вала – однопролётный;
- длина вала – 5687 мм;
- тип соединения вала с мешалкой – шпоночное;
- тип шпонки – призматическая по [47];
- тип муфт на валу – втулочно-пальцевые;
- тип уплотнения вала – торцевое;
- объём аппарата – 12,5 м³;
- внутренний диаметр аппарата – 1800 мм;
- высота аппарата – 5180;
- тип крышек и днищ – эллиптические по [35];
- тип теплообменного устройства – гладкая рубашка;
- тип теплоносителя в рубашке – холодная вода;
- внутренний диаметр рубашки – 1950 мм;
- высота рубашки – 4050 мм;
- площадь поверхности теплообмена – 23,3 м²;
- тип соединения корпуса с крышкой – фланцевое, исполнения 2 и 3 по [37];
- тип опор – опорные лапы по [41];
- число опорных лап – 4;

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Результаты расчетов реактора синтеза пропилена</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>						
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					103	
<i>Консульт.</i>						ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

- число технологических штуцеров – 8;
- характеристики штуцеров – по [28] (см. таб.3).

Проверку различных условий, осуществлявшуюся в течение расчётов, приведённых в настоящей работе, продемонстрируем в форме таблицы 7.

Таблица 7 – Результаты расчётов реактора синтеза полипропилена

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Технологический расчёт	Корпус аппарата	Объём, м ³	12,5	—
		Внутренний диаметр, мм	1800	—
		Высота, мм	5180	—
	Вал аппарата	Частота вращения, об/мин	180	—
	Привод	Мощность, кВт	1,5	—
	Теплообменная рубашка	Поверхность теплообмена, м ²	23,285	22,77
		Внутренний диаметр, мм	1950	—
		Высота, мм	4050	—
	Технологические штуцера	Условный проход, мм	(см. таб. 2)	—
		Толщина стенки, мм	(см. таб. 2)	—
		Длина, мм	(см. таб. 2)	—
Механический расчёт	Цилиндрическая обечайка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,03
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,449
	Эллиптическое днище корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,032
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,451
	Эллиптическая крышка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,729	1,032
		Давление для условий испытания, МПа	1,282	1,451

					ФЮРА	Лист
						104
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Цилиндрическая обечайка рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,1	0,942
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	0,951
	Эллиптическое днище рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,1	0,942
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	0,951
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек корпуса	Максимальное краевое напряжение, Па	4,5*10 ⁷	2,015*10 ⁸
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек рубашки	Максимальное краевое напряжение, Па	8,125*10 ⁶	1,996*10 ⁸
	Сопряжение рубашки с корпусом	Толщина сопряжения, мм	8	—
		Давление в рубашке	0,1	0,313
	Фланцевое соединение	Напряжение в болтах при затяжке, МПа	127,81	147
		Напряжение в болтах при рабочих условиях, МПа	89,064	143
		Удельное давление на прокладку, МПа	33,9	40
		Максимальное напряжение во фланце при затяжке, МПа	584,3	717,6

					ФЮРА	Лист
						105
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Фланцевое соединение	Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях, МПа	637,2	694,3
		Угол поворота, °	0,012	0,017
Механический расчёт	Опорные лапы аппарата	Нагрузка на одну опорную лапу, Н	47798	83940
	Вал аппарата	Условие виброустойчивости	0,593	0,7
		Динамическое смещение центра тяжести в опасном по жёсткости сечении, м	1,821*10-4	2,5*10-4
		Эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа	3,92	71,5
	Отверстия под люк-лаз и торцевое уплотнение	Давление на перемычку между отверстиями в рабочих условиях, МПа	0,729	1,215
		Давление на перемычку между отверстиями в условиях испытания, МПа	1,282	2,272
	Шпоночное соединение вала с мешалкой	Напряжение на смятие, МПа	6,8	310
		Напряжение на срез, МПа	1,515	108,5

					ФЮРА	Лист
						106
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕДИНЕНИЕ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4Г61	Гончарук Ирине Васильевне

Школа		Отделение школы (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	18.03.01 Химическая технология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности исследования.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей):</i>	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений	
2. Матрица SWOT	
3. График проведения и бюджет НИ	
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.04.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Татьяна Григорьевна	Кандидат экономических наук, доцент		27.04.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г61	Гончарук Ирина Васильевна		27.04.2021

8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрена экономическая целесообразность реализации проекта.

Целью проекта является создание автоматизированной системы проектирования химических реакторов и её реализация на примере реактора с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством для производства полипропилена.

Сферой применения проекта является одна из отраслей промышленности, а именно – химическое машиностроение.

Потенциальными потребителями результатов реализации проекта являются компании и частные лица, составляющие рынок химического оборудования.

Конечным результатом реализации проекта является удовлетворение двух потребностей:

- предоставление на рынок более энергоэффективного химического оборудования для производства полипропилена;
- упрощение процесса проектирования реакторов различного назначения за счёт создания программы их расчёта на базе MathCAD.

8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

В данном подразделе проект химического реактора для производства полипропилена рассмотрен с точки зрения его коммерческой значимости. Необходимые для данного рассмотрения расчёты произведены в соответствии с пособием [49].

8.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования. Сегментация рынка

В качестве двух основных критериев сегментирования рынка предполагается выделить:

- географическое положение (территория России, ближнее и дальнее зарубежье);
- тип потребителя (крупные химические компании, мелкие частные фирмы, частные лица).




По выбранным критериям была составлена карта сегментации рынка химического оборудования, отражённая на рисунке 23. В качестве конкурирующих компаний были взяты

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективност ь	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>						
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					108	
<i>Консульт.</i>						ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

предприятия Экотех НН Химтехпром, ОАО НИИПТхиммаш и торгово-промышленная компания «Стелла». Информация, необходимая для построения данной карты, была взята с официальных сайтов предприятий [50–52]

		Географическое положение		
		Российская федерация	Ближнее зарубежье	Дальнее зарубежье
Тип потребителя	Государственные компании			
	Частные компании			
	Частные лица			

Рисунок 23 – Карта сегментирования рынка химического оборудования

где  – Экотех НН Химтехпром  – ОАО НИИПТхиммаш  – ТПК «Стелла»

В соответствии с приведённой на рисунке 23 картой сегментирования были сделаны выводы:

- основные сегменты рынка химического оборудования в рамках данной работы было целесообразно разделить по признакам географического положения и типам потребителей;
- наиболее благоприятными для продаж химических реакторов на первых этапах развития предприятия, в соответствии с картой, являются сегменты, отображающие частные компании и частных лиц, базирующихся в Российской Федерации;
- привлекательными для предприятия в будущем, в соответствии с картой, представляются сегменты государственных компаний Российской Федерации и частных компаний ближнего зарубежья, однако в данном сегменте предстоит столкнуться с высокой конкуренцией.

8.1.2 Оценка перспективности разработки

Для оценки качества предлагаемой научной разработки и перспектив её коммерческого успеха была использована технология QuaD.

Для проведения анализа проекта по технологии QuaD были предварительно распределены веса критериев, по которым оценивается научная разработка. В рамках производства химических реакторов одними из наиболее весомых критериев были выбраны:

- энергоэффективность – 0,12;

					ФЮРА	Лист
						109
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- надёжность – 0,12;
- безопасность – 0,1;
- простота эксплуатации – 0,1;
- ремонтпригодность – 0,1;
- цена – 0,1.

В соответствии с результатами конструктивно-механического расчёта химического реактора одними из наивысших баллов были отмечены следующие критерии:

- простота эксплуатации – 96;
- унифицированность – 95;
- надёжность – 94;
- безопасность – 93;
- энергоэффективность – 92.

В соответствии с пособием [49] список критериев, их веса, а также необходимые расчётные величины заносятся в таблицу 8.

Таблица 8 – Оценочная карта для анализа по технологии QuaD [49]

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,12	92	100	0,92	0,1104
2. Помехоустойчивость	0,05	91	100	0,91	0,0455
3. Надёжность	0,12	94	100	0,94	0,1128
4. Унифицированность	0,05	95	100	0,95	0,0475
5. Уровень материалоемкости разработки	0,08	75	100	0,75	0,06
6. Уровень шума	0,01	82	100	0,82	0,0082
7. Безопасность	0,1	93	100	0,93	0,093
8. Потребность в ресурсах памяти	0,005	85	100	0,85	0,00425
9. Функциональная мощность	0,02	87	100	0,87	0,0174
10. Простота эксплуатации	0,1	96	100	0,96	0,096
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,005	83	100	0,83	0,00415
12. Ремонтпригодность	0,1	90	100	0,9	0,09

					ФЮРА	Лист
						110
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13.Конкуренто-способность продукта	0,04	79	100	0,79	0,0316
14. Уровень проникновения на рынок	0,01	65	100	0,65	0,0065
15.Перспектив-ность рынка	0,01	78	100	0,78	0,0078
16. Цена	0,1	72	100	0,72	0,072
17. Послепро-дажное обслу-живание	0,03	81	100	0,81	0,0243
18. Финансовая эффективность научной разра-ботки	0,03	74	100	0,74	0,0222
19. Срок выхода на рынок	0,01	69	100	0,69	0,0069
20. Наличие сертификации разработки	0,01	68	100	0,68	0,0068
Итого	1				0,85805

Величина, помещённая в графе таблицы «Итого», рассчитана по формуле из [49]:

$$P_{cp} = \sum_{i=1}^{20} (B_i \cdot B_i) \quad (8.1)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя [49].

В соответствии с предложенной в [49] классификацией можно говорить о перспективности научной разработки, поскольку значение средневзвешенного показателя качества и перспективности составило 0,86 или 86 баллов. Однако, в результате анализа было выяснено, что слабостью разработки могут оказаться уровень проникновения и сроки выхода на рынок. Эти слабые места необходимо учесть в последующих частях данного раздела работы, а именно – в SWOT-анализе.

8.1.3 SWOT-анализ разработки

В рамках данного подраздела был произведён анализ сильных и слабых сторон разработки, рассмотрены перспективы возникновения благоприятных возможностей и угроз, а также дан анализ их корреляции. Матрица SWOT-анализа представлена в данной работе в виде таблицы 9 [49].

					ФЮРА	Лист
						111
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 9 – Матрица SWOT [49]

<p>Возможности:</p> <p>В1. Координация деятельности ТПУ с компаниями, являющимися ведущими в химической отрасли.</p> <p>В2. Финансирование разработки университетом.</p> <p>В3. Возможность задействования сторонних специалистов для развития проекта.</p> <p>В4. Близость одной из химических компаний к месту проектирования (Томскнефтехим).</p> <p>В5. Возникновение дополнительного спроса на производимый продукт (полипропилен).</p>	<p>Сильные стороны и возможности:</p> <p>1. Имеется перспектива дальнейшего развития проекта при сотрудничестве с другими подразделениями ТПУ.</p> <p>2. Есть возможность установить контакт с компаниями, производящими химическое оборудование, по каналам связи университета.</p> <p>3. Привлечение в проект дополнительных специалистов повысит экологичность и энергоэффективность проекта.</p> <p>4. При работе с более опытными специалистами возникает возможность усовершенствования технологии расчёта реакторов и её переноса на базу более совершенных вычислительных программ.</p> <p>5. Увеличение спроса на полипропилен приведёт к повышению спроса на оборудование для его производства.</p>	<p>Слабые стороны и возможности:</p> <p>1. Относительная универсальность полученной программы компенсирует однозадачность проекта.</p> <p>2. Создание прототипа аппарата может быть профинансировано ТПУ или другими организациями, заинтересованными в разработке.</p> <p>3. Привлечение более опытных специалистов нивелирует недостатки начальной команды.</p> <p>4. Разработка аппарата может быть ускорена через сотрудничество с компаниями-партнёрами.</p> <p>5. Внедрение аппарата в производство также может быть произведено на базе одной из компаний-партнёров</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Падение спроса на продукт, производимый аппаратом.</p> <p>У2. Угроза возникновения сложностей в поставке катализатора полимеризации.</p> <p>У3. Малое число потенциальных потребителей.</p> <p>У4. Склонность к импорту оборудования из дальнего зарубежья.</p> <p>У5. Введение новых государственных требований к производству продукции.</p>	<p>Сильные стороны и угрозы:</p> <p>1. Проект можно переориентировать на реакторы для других продуктов ввиду универсальности программы.</p> <p>2. Для преодоления конкуренции импортного оборудования необходимо будет на первых этапах внедрения аппаратов на рынок ориентироваться на менее крупного потребителя, а именно – на мелкие компании и на частных лиц.</p> <p>3. Ввиду принятых в</p>	<p>Слабые стороны и угрозы:</p> <p>43. Точное сегментирование рынка позволит избежать проигрышной конкуренции с крупными или импортными компаниями, а также снизит вред такого недостатка, как однозадачность разработки.</p> <p>12. Выступление с результатами проекта на научно-практической конференции позволят повысить известность команды и, в случае победы, найти спонсора для промышленной реализации проекта.</p> <p>54. Перестройка программы</p>

					ФЮРА	Лист
						112
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

	процессе проектирования реактора решений изменения в области стандартизации продукции не отразятся на проекте значительно и не потребуют его переработки.	под реакторы для иных продуктов потребует увеличения времени проектирования, однако этот фактор также можно проконтролировать привлечением специалистов из сторонних организаций. 4. При введении новых требований в области стандартизации необходимо увеличить время разработки проекта и скорректировать некоторые детали расчётов в соответствии с новыми стандартами и нормами.
--	---	---

Результаты SWOT-анализа показывают, что универсальность программы, по которой рассчитывается химический реактор, позволяет решить большую часть внешних проблем, с которыми предстоит столкнуться разработчикам, в частности – падение спроса на продукт производства и ужесточение норм в области стандартизации.

В свою очередь, контакты в ТПУ и привлечение специалистов различного профиля в проект позволят развить его изнутри и повысить общий профессионализм команды.

8.2 Планирование научно-исследовательских работ

В данном разделе изложены аспекты планирования научно-исследовательской работы, перечислены этапы, необходимые для проектирования аппарата, подсчитано время, которое должно быть затрачено на выполнение каждого этапа и построена диаграмма, позволяющая рационально распределить временной ресурс между руководителем проекта и инженером.

8.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование структуры работ включает в себя составление перечня этапов, необходимых для исполнения проекта химического реактора для полипропилена. Такой перечень дан в таблице 10 [49]. Подпунктам основных этапов разработки в рамках данной таблицы присвоена сквозная нумерация, которая и далее будет использоваться в данной работе. Кроме того, было произведено распределение ответственности за выполнение той или иной работы между руководителем проекта и инженером, исполняющим данный проект.

					ФЮРА	Лист
						113
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Проведение патентных исследований	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
Выбор направления исследований	5	Выбор и анализ технологической схемы	Руководитель, инженер
	6	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Проведение исследования	7	Проведение технологических расчётов	Инженер
	8	Проведение конструктивно-механических расчётов	Инженер
	9	Осуществление теоретического анализа в области экологии	Инженер
	10	Оценка экономической значимости проекта	Инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности и обобщение полученных результатов	Руководитель, инженер
Разработка технической документации	12	Составление и оформление пояснительной записки	Инженер
Разработка технической документации	13	Изготовление чертежей и другого графического материала	Инженер
Представление проекта	14	Представление результатов научно- исследовательской работы	Инженер

8.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Рассмотрим в качестве примера расчёта трудоёмкости этап работы, заключающийся в составлении и утверждении технического задания. Исполнителем на данном этапе является руководитель дипломного проекта. При наиболее благоприятных условиях для анализа, систематизации и представления информации в виде технического задания руководителю потребуется 2 человеко-дня. В случае наиболее неблагоприятных условий, которые могут включать большую загруженность или болезнь, составление технического задания может

					ФЮРА	Лист
						114
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

занять 4 человеко-дня. Исходя из предложенной в [49] формулы, осуществляем расчёт ожидаемой трудоёмкости для первого этапа работы:

$$t_{ож.1} = \frac{3 \cdot t_{min.1} + 2 \cdot t_{max.1}}{5} = 2.8 \text{ чел-дн (8.2)}$$

где $t_{ож.1}$ – ожидаемая трудоёмкость 1 работы; $t_{min.1}$ – минимальная трудоёмкость 1 работы, чел-дн; $t_{max.1}$ – максимальная трудоёмкость 1 работы, человеко-дня [49].

Поскольку руководитель выполняет данную работу один, в соответствии с формулой из пособия [49] продолжительность работы составит:

$$T_{р.1} = \frac{t_{ож.1}}{Ч_1} = 2.8 \text{ (8.3)}$$

где $T_{р.1}$ – продолжительность 1 работы, раб. дн.; $Ч_1$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [49].

Подобные рассуждения и расчёты осуществляются для всех подпунктов основных этапов научно-исследовательской работы.

8.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках данного подпункта осуществлено построение диаграммы Ганта и проведены необходимые расчёты для её построения.

При построении графика необходимо перевести рабочие дни в календарные, для чего используется следующая формула:

$$T_{к.i} = T_{р.i} \cdot k_{кал} \text{ (8.4)}$$

где $T_{к.i}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; $k_{кал}$ – коэффициент календарности [49].

Данный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \text{ (8.5)}$$

где $T_{кал}$ – число календарных дней в году; $T_{вых}$ – число выходных дней в году; $T_{пр}$ – число праздничных дней в году [49].

В 2021 году, для которого производится расчёт, число календарных дней составило 365, праздничных – 14, выходных – 104. Таким образом, по формуле (8.5):

$$k_{кал} = \frac{365}{(365 - 104 - 14)} = 1.48$$

Примем коэффициент календарности равным 1,5. Все рассчитанные значения заносятся в таблицу 11 [49].

					ФЮРА	Лист
						115
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования [49]

Номер работы	Трудоёмкость работ			Число исполнителей	Длительность работ в рабочих днях	Длительность работ в календарных днях
	tmin, чел-дн	tmax, чел-дн	тож, чел-дн			
1	2	4	2,8	1	3	4
2	5	8	6,2	1	6	9
3	4	5	4,4	1	4	7
4	1	2	1,4	2	1	1
5	1	2	1,4	2	1	1
6	2	4	2,8	1	3	4
7	5	12	7,8	1	8	12
8	16	28	20,8	1	21	31
9	3	10	5,8	1	6	9
10	3	10	5,8	1	6	9
11	1	2	1,4	2	1	1
12	8	10	8,8	1	9	13
13	8	10	8,8	1	9	13
14	1	1	1	1	1	1

Общая длительность работ в рабочих днях составила 79 дней, в календарных – 115.

Диаграмма Ганта для научно-исследовательской работы в целях проектирования химического реактора для производства полипропилена представлена на рисунке 24.

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{к.и.} , кал. дн.															
				фев			мар			апр			май			июн		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление ТЗ	Руководитель	4															
2	Изучение теории	Инженер	9															
3	Патентный поиск	Инженер	7															
4	Выбор направления	Руков., инж.	1															
5	Анализ схемы	Руков., инж.	1															
6	Календарное планирование	Руководитель	4															
7	Тех. Расчёт	Инженер	12															
8	Мех. Расчёт	Инженер	31															
9	Экология	Инженер	9															
10	Менеджмент	Инженер	9															
11	Подведение итогов	Руков., инж.	1															
12	Составление ПЗ	Инженер	13															
13	Создание чертежей	Инженер	13															
14	Презентация	Инженер	1															

Рисунок 24 – Календарный план график проведения НИР по теме

					ФЮРА	Лист
						116
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

8.3 Бюджет научно-технического исследования

Планирование бюджета позволяет оценить затраты на проведение исследования до его фактического начала и позволяет судить об экономической эффективности работы. В данном разделе подсчитываются следующие статьи расходов:

- материальные затраты;
- амортизационные отчисления;
- заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

8.3.1 Расчёт материальных затрат

В этом подразделе оценивается стоимость всех материальных ценностей, непосредственно расходуемых в процессе выполнения работ.

Теоретические исследования, а также моделирование системы требуют ряд программных продуктов: MicrosoftOffice, Mathcad, MATLAB, CODESYS и др. Большинство из них предоставляются бесплатно для студентов ТПУ, другие находятся в свободном доступе в сети «Интернет». Таким образом, затраты на материалы включают в себя расходы на канцелярские принадлежности, кабель для подключения к контроллеру лабораторного стенда. Для исследований используется персональный компьютер с бесплатным доступом к лицензии MATLAB. В материальные затраты также включаются транспортно-заготовительные расходы (ТЗР) в пределах от 5% до 20% от общей цены материалов. Расчёт материальных затрат приведён в таблице 12.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, шт.	Сумма, руб.
Офисная бумага, упак. 500 листов	310	1	310
Тетрадь общая, 48 л.	50	1	50
Шариковая ручка	30	3	90
Патч-корд RJ-45, кат. 5е, 2м	300	1	300
Итого			750
Итого с учётом ТЗР (10%)			825

8.3.2 Расчёт амортизационных отчислений

Написание выпускной квалификационной работы по плану занимает 5 месяцев. Для моделирования и проведения расчётов используется персональный компьютер первоначальной стоимостью 60000 рублей. Срок полезного использования для офисной техники составляет от 2 до 3 лет [49]

Норма амортизации H_A :

					ФЮРА	Лист
						117
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$H_A = \frac{1}{T} \cdot 100\% , (8.6)$$

где T – срок полезного использования, лет.

Если принять срок полезного использования равным 3 годам, тогда норма амортизации H_A :

$$H_A = \frac{1}{3} \cdot 100\% = 33,3\% . (8.7)$$

Годовые амортизационные отчисления:

$$A_{год} = 60000 \cdot 0,33 = 19800 \text{ руб.} (8.9)$$

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_{мес} = \frac{19800}{12} = 1650 \text{ руб.} (8.10)$$

Итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 1650 \cdot 5 = 8250 \text{ руб.}$$

8.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В исполнении проекта, описываемого в данной бакалаврской работе, задействованы два работника: руководитель и инженер. Пример расчёта основной заработной платы дадим на примере руководителя, результаты расчёта для инженера будут занесены в сводную таблицу.

По рекомендации консультанта по разделу работы «Финансовый менеджмент» месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_м = З_{ок} \cdot k_p (8.11)$$

где $З_м$ – месячный должностной оклад работника, руб; $З_{ок}$ – оклад работника, руб; k_p – районный коэффициент, равный для Томска 1,3 [49].

Поскольку научным руководителем является доцент, его оклад составляет 36174 рубля. Таким образом:

$$З_м = 36174 \cdot 1,3 = 47026,2 \text{ руб}$$

Для расчёта среднедневной заработной платы используется формула из [49]:

$$З_д = \frac{З_м \cdot М}{F_d} (8.12)$$

где $З_д$ – среднедневная заработная плата, руб; $М$ – количество месяцев работы без отпусков в течение года; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. [49].

					ФЮРА	Лист
						118
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Расчёт действительного годового фонда рабочего времени сводится в таблицу 13. Учтём, что руководитель работает по шестидневной рабочей неделе, а инженер – по пятидневной.

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:	52	104
• выходные дни;	14	14
• праздничные дни.		
Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени:	48	24
• отпуск;	0	0
• невыход по болезни.		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Количество месяцев работы без отпуска для руководителя-доцента, работающего по шестидневной рабочей неделе с отпуском в 48 рабочих дней, составит 10,4 месяца. Таким образом, по формуле (8.13):

$$З_{\text{дн}} = \frac{47026,2 \cdot 10,4}{251} = 1948,5 \text{ руб}$$

Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (8.14)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб; T_p – продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником, раб. дн. [49].

Продолжительность работ для научного руководителя принимаем в соответствии с данными таблицы 11 равной 6 рабочим дням. Таким образом:

$$З_{\text{осн}} = 1948,5 \cdot 6 = 11691 \text{ руб}$$

Как и было сказано выше, результаты расчёта основной заработной платы инженера сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Должность	З _{ок} , руб	К _р	З _м , руб	З _{дн} , руб	T _р , руб	З _{осн} , руб
Руководитель	Доцент	36174	1,3	47026,2	1948,5	6	11691
Инженер	Инженер	14963	1,3	19451,9	977	5	4885
Итого							16576

					ФЮРА	Лист
						119
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

8.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В соответствии с пособием [49] дополнительная заработная плата исполнителей темы равна:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (8.15)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата исполнителей темы, руб; $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, на стадии проектирования принимаемый равным от 0,12 до 0,15 [49].

Примем $k_{\text{доп}}$ равным 0,12. Таким образом, для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 11691 = 1402,9 \text{ руб}$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 4885 = 586,2 \text{ руб}$$

Исполнители	$З_{\text{доп}}$
Руководитель	1402,9
Инженер	586,2
Итого	1989,1

8.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В соответствии с пособием [49] сумма отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (8.16)$$

где $З_{\text{внеб}}$ – сумма отчислений во внебюджетные фонды, руб; $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (принимается равным 27,1%) [49].

Также по рекомендации пособия [49] расчёт отчислений во внебюджетные фонды оформлен в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Руководитель	11691	1402,9
Инженер	4885	586,2
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	27,1	
Итого	3548,4	1482,7

8.3.5 Расчёт общей себестоимости

В соответствии с пособием [49] накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$З_{\text{накл}} = \sum \text{ст} \cdot k_{\text{нр}} \quad (8.17)$$

где $З_{\text{накл}}$ – сумма накладных расходов, руб; $\sum \text{ст}$ – сумма статей бюджета с первой по четвертую, руб; $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимаемый равным 10%) [49].

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 16.

					ФЮРА	Лист
						120
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 16 – Суммарные расходы

Наименование	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	825	2,3
Затраты на амортизацию	8250	23,0
Основная заработная плата	16576	46,1
Дополнительная заработная плата	1989,1	5,5
Страховые взносы	5031,1	14,0
Накладные расходы	3267,1	9,1
Итого	35938,3	100

В ходе подсчёта затрат на разработку проекта выявлено, что основная часть (46,1%) средств расходуется на заработную плату исполнителей.

8.4 Оценка научно-технического эффекта разработки

Для проведения данной оценки необходимо рассчитать коэффициент научно-технического эффекта по следующей формуле:

$$H = \sum_{i=1}^4 (k_i \cdot n_i) \quad (8.18)$$

где H – показатель научно-технического эффекта; k_i – весовой коэффициент i-го признака; n_i – оценка i-го признака в баллах.

Признаки научно-технического эффекта разработки систематизируются в соответствующую таблицу 17, в которой также проставляются баллы по каждому признаку.

Таблица 17 – Оценка научно-технического эффекта разработки

Признак НТУ	Весовой коэффициент	Балл	Характеристика разработки	Выбранный балл
Уровень новизны	0,6	от 8 до 10 от 5 до 7 от 2 до 4 0	Принципиально новая Новая Относительно новая Не обладает новизной	5
Теоретический уровень результатов	0,4	10 8 6 2 0,5	Установление закона Глубокая разработка проблемы Разработка способа Элементарный анализ Изложение опыта	6
Возможность реализации	0,2	Время реализации		10
		10 4 2	В течении первых лет От 5 до 10 Свыше 10 лет	
		Масштаб реализации		
		10 4 2	Народное хозяйство Отрасль Одно или несколько предприятий	4

					ФЮРА	Лист
						121
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таким образом, по формуле (8.18):

$$H = 0,6 \cdot 5 + 0,4 \cdot 6 + 0,2 \cdot 10 + 0,2 \cdot 4 = 8,2$$

Вывод

В целом, эффективность исследуемого подхода предварительного моделирования системы в каждом конкретном случае можно оценить исходя из вероятных затрат на восстановление работоспособности объекта при ошибке разработчика или оператора системы автоматического регулирования (зачастую стоимость промышленных систем составляет сотни тысяч, а иногда и миллионы рублей).

					ФЮРА	<i>Лист</i>
						122
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-4Г61	Гончарук Ирина Васильевна

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	18.03.01 «Химическая технология»

Тема ВКР:

Проектирование реактора для получения полипропилена

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является реактор для получения полипропилена методом суспензионной полимеризации пропилена в среде гептана с использованием металлоорганического катализатора (nMgCl ₂ (mTiCl ₄) и сокатализатора (Al(C ₂ H ₅) ₃) в реакторе, оснащённом механической лопастной мешалкой и тепловой рубашкой. Процесс является непрерывным. Широкая область применения: в быту, в медицине, в машиностроении, в пищевой промышленности и так далее
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Трудовой кодекс РФ N 197-ФЗ; - Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» N 426-ФЗ; - ГОСТ 12.2.003-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования»; - ГОСТ 12.2.049-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования».
2. Производственная безопасность: <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть при разработке проектируемого решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - действие фактора на организм человека; - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ). <p>Вредные и опасные факторы,</p>

	<p>которые могут возникнуть при внедрении объекта исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> - повышенная температура поверхности оборудования и материалов повышенное давление
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> - предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений, - предложены решение по защите селитебной зоны, по защите атмосферы, гидросферы и литосферы.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> - наиболее вероятные чрезвычайные ситуации на производстве полипропилена; - ряд мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение технологического процесса; - порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.04.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		27.04.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4Г61	Гончарук Ирина Васильевна		27.04.2021

9 Социальная ответственность

В рамках данного раздела конструкторского проекта, изложены вредные и опасные факторы производства полипропилена на стадии полимеризации в реакторе, представлены пути нейтрализации либо минимизации их вредного влияния на работников, даны рекомендации по предотвращению чрезвычайных ситуаций, а также изложены правила, регламентирующие трудовое законодательство в данной области.

9.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В первом подразделе рассматриваются специальные нормы трудового законодательства при проектировании и работы с реактором для получения полипропилена при компоновке рабочей зоны.

9.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

В первую очередь учитывается Трудовой кодекс РФ (ТК РФ) [53] статьи 92, продолжительность рабочего времени для работников, условия труда на рабочих местах, которых по результатам специальной оценки условий труда отнесены к вредным условиям труда 3 или 4 степени или опасным условиям труда, - не более 36 часов в неделю. Работающим с вредными и опасными условиями предоставляется дополнительный отпуск, согласно статье 117 ТК РФ, при этом минимальная продолжительность ежегодного дополнительного оплачиваемого отпуска работникам, указанным в части первой настоящей статьи, составляет 7 календарных дней.

Федеральный закон №426-ФЗ от 28 декабря 2013 года - проектируемый реактор для получения полипропилена относится к категории: вредные условия труда (3 класс), подкласс 3.1, так как осуществляется работа с приборами под давлением, а также работа с использованием вредных химических веществ.

Оплата работы в опасных и вредных условиях труда отмечена в статье 147 ТК РФ, согласно которой, оплата труда работников, устанавливается в повышенном размере, при этом минимальный размер повышения оплаты труда работникам составляет 4 процента тарифной ставки (оклада), установленной для различных видов работ с нормальными условиями труда. Все рабочие и служащие, поступающие на работу, подлежат предварительному медицинскому освидетельствованию, а также периодическому

					ФЮРА			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Гончарук И.В.</i>						
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					125	
<i>Консульт.</i>						ТПУ гр. 3-4Г61		
<i>Н. контр.</i>								
<i>Рук-ль ООП</i>								

медицинскому осмотру (статья 213 ТК РФ). Работники, осуществляющие отдельные виды деятельности, в том числе связанной с источниками повышенной опасности (с влиянием вредных веществ и неблагоприятных производственных факторов), а также работающие в условиях повышенной опасности, проходят обязательное психиатрическое освидетельствование не реже одного раза в пять лет.

9.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

По ГОСТу 22269-79 взаимное расположение элементов рабочего места должно обеспечивать возможность свободного и комфортного передвижения во время работы с учетом налагаемой спецодежды. Так же взаимное расположение элементов рабочего места должно способствовать оптимальному режиму труда и отдыха, снижению утомления оператора, предупреждению появления ошибочных действий [3]. Организация рабочего места представляет собой меры, обеспечивающие эффективное использование рабочей силы и оборудования. Главная цель организационных мероприятий, это обеспечение работников высококачественным, эффективным и исправным оборудованием, так же создание комфортных и безопасных условий труда.

Расположение рабочих поверхностей при работе стоя, а также при работе сидя должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» [4], ГОСТ 12.2.049-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования». Конструкция оборудования, должна при организации трудового процесса, исключать монотонность труда, путем ограничения частоты повторения простых трудовых действий и длительности непрерывного пассивного наблюдения за ходом производственного процесса или его части [5].

9.2 Производственная безопасность

В рамках данного подраздела рассмотрены вредные и опасные факторы производства полипропилена на стадии полимеризации. Собранные данные систематизированы в таблице 18.

					ФЮРА	Лист
						126
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 18 – Опасные и вредные производственные факторы на стадии полимеризации пропилена

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [55]		Нормативные документы
	вредные	опасные	
этилен ПДК* – 100 мг/м3	вдыхание: возможна потеря сознания	чрезвычайно огнеопасен	справочник [57] стандарт [58]
пропилен ПДК – 100 мг/м3 [56]	вдыхание: вызывает сонливость	чрезвычайно огнеопасен ; взрывоопасен в смеси с воздухом; кожа: обморожение	справочник [57] стандарт [59]
водород	вдыхание: удушье	чрезвычайно огнеопасен ; взрывоопасен в смеси с воздухом; кожа: серьёзное обморожение	справочник [57] стандарт [60]
гептан ПДК – 100 мг/м3 [56]	вдыхание: вялость, головная боль; кожа: сухость; глаза: покраснение и боль; проглатывание: колики, жжение, тошнота, рвота	сильно огнеопасен ; взрывоопасен в смеси с воздухом	справочник [57] стандарт [61]
бутанол ПДК – 10 мг/м3 [56]	вдыхание: кашель, головокружение, Сонливость, головная боль; кожа: сухость, шероховатость; глаза: неясность зрения, жжение; проглатывание: боль в животе, сонливость, рвота	огнеопасен ; пары могут образовывать взрывоопасные смеси с воздухом; глаза: светобоязнь, возможно повреждение роговицы	справочник [57] стандарт [62]
диэтилалюминийхлорид	—	пожароопасен ; раствор представляет собой пирофорную жидкость	справочник [57]
пары соляной кислоты ПДК – 5 мг/м3 [56]	вдыхание: раздражение дыхательных путей; глаза: раздражение слизистой оболочки;	ожоги кожных покровов; поражение лёгких	стандарт [63]

					ФЮРА	Лист
						127
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [55]		Нормативные документы
	вредные	опасные	
раствор едкого натра 20% ПДК – 0,5 мг/м ³ [57]	—	кожа: химические ожоги; глаза: потеря зрения	стандарт [64]
азот	удушье при высоких концентрациях в воздухе рабочей зоны	—	стандарт [65]
чистка трубопроводов	воздействие паров вредных веществ	образование взрыво- и пожароопасных смесей	справочник [57] стандарт [66]
работы на трубопроводах пара	—	возможно получение термических ожогов	стандарт [67]
работа с электрооборудованием	—	возможно поражение электрическим током	стандарт [68]
обслуживание оборудования с вращающимися механизмами	неблагоприятное воздействие шума и вибраций	возможно получение механических травм ; травмы, связанные с воздействием шума и вибраций	стандарты [69–70]
производственный микроклимат	неблагоприятные условия	—	норма [71]
производственное освещение	нерационально спроектированное освещение	—	норма [72]

* – значения ПДК даны для нормы в воздухе рабочей зоны.

Соответствуя данным, систематизированным в таблице 18, а также руководствуясь стандартами и нормами [56, 58–72], можно дать следующие рекомендации по вредным и опасным производственным факторам:

- **поражение органов дыхания.** Источником являются пары различных вредных веществ. Природа фактора химическая. Допустимые нормы приведены в таблице 18 в соответствии со стандартом [56]. Для защиты органов дыхания рекомендуется применять противогаз марки БКФ, респираторы «Лепесток», самоспасатели ПДУ-3. При работе внутри аппаратов применяются шланговые противогазы ПШ-1, ПШ-2.

- **поражение кожи.** Источником являются пары различных вредных веществ, вредные вещества в жидком состоянии, горячий пар. Природа фактора химическая. Для защиты кожных покровов рекомендуется использовать соответствующую спецодежду, производить

					ФЮРА	Лист
						128
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

работы только в резиновых перчатках, при необходимости надевать прорезиненные фартуки.

- **поражение глаз.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Защита глаз производится в сочетании с защитой органов дыхания либо при помощи специальных защитных масок.

- **поражение желудочно-кишечного тракта.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Для защиты от проглатывания вредных и опасных веществ строго запрещается употреблять еду, напитки, а также курить во время работы.

- **пожаро- и взрывоопасность.** Источником являются пары этилена, пропилена, водорода, гептана и бутанола в смеси с воздухом. Природа фактора физико-химическая. Предел взрываемости в объёмных процентах в воздухе: для этилена – от 2,7 до 6,0; для пропилена – от 2,4 до 10,3; для водорода – от 4 до 76; для гептана – от 1,1 до 6,7; для бутанола – от 1,4 до 11,3 [71]. Рекомендации по безопасности – не допускать в процессе работы оборудования огня, искр, курения, применять вентиляцию и защищённое от взрыва электрооборудование. В качестве средств защиты применять автоматическую систему пенного пожаротушения, пожарные гидранты, огнетушители ОПУ-5.

- **поражение электрическим током.** Источником являются неисправное электрооборудование, оборудование с нарушенной изоляцией, а также поверхности, способные аккумулировать статический электрический заряд. Природа фактора физическая, электрическая. Для обеспечения электробезопасности на производстве необходима регулярная проверка оборудования на исправность, а также создание единой системы заземления во избежание накопления статического заряда. Повышенная электробезопасность в установках достигается применением систем защитного заземления, зануления, защитного отключения и других средств, и методов защиты, в том числе знаков безопасности и предупредительных плакатов и надписей.

- **механические травмы.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, механическая. Для обеспечения промышленной безопасности по данному фактору необходимо производить эксплуатацию оборудования в соответствии с технологическим регламентом и правилами техники безопасности.

- **шум и вибрации.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, в том числе акустическая. Допустимые значения параметров шума в производственном помещении- 85 дБ [69]. Норма вибраций 95 дБ [71]. Основными мерами по снижению шума

					ФЮРА	Лист
						129
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

и вибрации на данном производстве являются: средства индивидуальной защита (наушники); строительно- акустические мероприятия.

- **производственный микроклимат.** Источником является различное оборудование, находящееся в помещении. Природа фактора физическая, включающая в себя параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха. Нормы для производственного микроклимата: температура рабочей среды от 17°С до 20°, относительная влажность от 40% до 60%, скорость воздуха не более 1 м/с [71].

- **производственное освещение.** Источником являются солнце и различные приборы для искусственного освещения помещения. Природа фактора физическая, представляющая собой излучение. Нормы естественного освещения от 280 до 330 лк [72]. Предпочтение может быть отдано освещению на галогеновых лампах (лампы накаливания с йодным цинком) со сроком службы до трех тысяч часов и спектром излучения, близком к естественному. Конструкция светильника должна надежно защищать источник света от пыли и других внешних факторов, обеспечивать электро-, пожаро- и взрывобезопасность, стабильность светотехнических характеристик в данных условиях среды, удобство монтажа и обслуживания. Поскольку в рабочей зоне могут находиться взрывопожароопасные вещества, светильник должен быть взрывобезопасного исполнения типа ВЗГ.

9.3 Экологическая безопасность

В соответствии с перечисленными в предыдущем разделе вредными и опасными производственными факторами, в первую очередь касающимися вредных химических веществ, применяемых при производстве полипропилена, необходимо дать следующие рекомендации в целях соблюдения экологической безопасности.

9.3.1 Защита селитебной зоны

В соответствии с постановлением [71] производство полипропилена является производством II класса опасности и предполагает создание вокруг предприятия санитарно-защитной зоны радиусом 500 м.

9.3.2 Защита атмосферы

Вредными веществами, способными попасть в атмосферу в результате разгерметизации оборудования, являются пропилен, гептан и бутанол. Для защиты оборудования от разгерметизации и попадания вредных веществ в окружающую среду установлены предохранительные клапаны. Газовые выбросы от этих клапанов при ведении технологического процесса направляются в факельный коллектор на сжигание.

					ФЮРА	Лист
						130
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для обеспечения защиты атмосферы доля вредных веществ в промышленных выбросах, должна соответствовать значениям ПДК_{атм.в}, а именно: для пропилена – 3 мг/м³; для гептана – 1,5 мг/м³; для бутанола – 0,1 мг/м³ [71].

9.3.3 Защита гидросферы

Для защиты гидросферы от вредных веществ, имеющих возможность попасть в среду через стоки предприятия, сточные воды от промывки оборудования и мытья полов должны быть направлены в химзагрязненную канализацию и далее на установку локальной очистки сточных вод для очистки от соединений титана, алюминия, порошка полипропилена, масла. Жидкие отходы непосредственно в отделении полимеризации отсутствуют. ПДК для воды рыбохозяйственных водоёмов составляют: для бутанола – 0,03 мг/дм³; для взвешенных частиц – 0,75 мг/дм³ [71].

9.3.4 Защита литосферы

Загрязнителями литосферы в производстве полипропилена являются твёрдые отходы, состоящие из различных веществ и образующиеся при чистке оборудования. Основу таких отходов составляет порошок полипропилена, их утилизация должна осуществляться посредством сборки в специальные пластиковые контейнеры или полиэтиленовые мешки с последующим отвозом на полигон токсичных отходов. Предельно допустимая концентрация полипропилена в порошкообразном состоянии в почве нормативными документами не устанавливается.

9.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией в рамках производства полипропилена может считаться взрыв или пожар ввиду большого количества легко воспламеняющихся веществ, задействованных в технологии. Общие представления о поведении в чрезвычайных ситуациях даны в стандартах [74, 75].

Защита от возникновения возгорания достигается комплексом мер, частично описанных в предыдущих пунктах данного раздела. В частности, таковыми мерами являются: оборудование цехов огнетушителями, предназначенными для тушения горящих органических веществ; контроль состава воздуха рабочей зоны в целях предотвращения возникновения взрывоопасных смесей; организация заземления оборудования для предотвращения скапливания статического электричества и возникновения пробоев и искр.

При возникновении возгорания на предприятии, содержащем аварийно-опасные химические вещества, следует придерживаться следующего порядка действий:

- установить точное наименование и количество хранящихся веществ;

					ФЮРА	Лист
						131
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- привлечь к работе специалистов объекта и в процессе работы согласовывать с ними свои действия;
- применять огнетушащие вещества и способы ликвидации горения с учетом свойств хранящихся веществ;
- предусмотреть отвод загрязненной воды в места, безопасные для людей и животных;
- выбирать позиции ствольщиков преимущественно с наветренной стороны; при образовании облака паров и газов АХОВ, эвакуировать с подветренной стороны людей и животных и организовать осаднение облака путем подачи распыленных струй;
- вызвать санитарно-эпидемиологическую службу для контроля за изменением концентрации опасных веществ в продуктах горения, и после ликвидации пожара;
- совместно с администрацией объекта определить предельно допустимое время пребывания личного состава на зараженном участке;
- установку пожарных и аварийно-спасательных автомобилей произвести так, чтобы они не попали в зону заражения;
- в зоне заражения тушение пожаров и проведение АСР проводить после получения соответствующего допуска и минимальным количеством личного состава, обеспечив его индивидуальными средствами защиты, соответствующими виду АХОВ, находящемуся на объекте;
- организовать отвод воды в определенное место и принять меры по предотвращению поражения людей и животных отравленной водой;
- после пожара, проведения АСР организовать санитарную обработку личного состава, работавшего в зоне заражения, провести дегазацию специальной одежды, пожарной и аварийно-спасательной техники, пожарно-технического и аварийно-спасательного вооружения и оборудования, провести медицинский осмотр всех участников тушения пожара, проведения АСР.

Вывод

В данном разделе были проанализированы вредные и опасные факторы, возникающие при эксплуатации аппарата, определены меры по снижению воздействия этих факторов на работающего; определены методы повышения экологической безопасности литосферы; рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации и разработан порядок действий в результате возникновения чрезвычайной ситуации, а также меры по её предупреждению.

					ФЮРА	<i>Лист</i>
						132
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Заключение

В рамках данной бакалаврской работы, был произведен технологический и конструктивно-механический расчет аппарата с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой, предназначенного для синтеза полипропилена методом полимеризации в тяжелом растворителе (гептан). В результате произведённых расчетов были определены основные геометрические параметры аппарата, рассчитаны штуцера, фланцевое соединение, опоры, подобраны привод и стойка для перемешивающего устройства, а также выбрана мешалка. По результатам механических расчетов, представленных в разделе 7, можно сделать заключение, что все подобранные элементы конструкции удовлетворяют условиям прочности и устойчивости, вал перемешивающего устройства так же удовлетворяет условиям жесткости и виброустойчивости. В связи с чем, результаты данной работы могут быть применены для построения аппарата и использования его на действующих промышленных предприятиях, специализирующихся на подобной продукции. В качестве примера заинтересованного предприятия можно привести “Томскнефтехим”.

В разделе “Финансовый менеджмент” оценены экономические аспекты исследуемого подхода к построению системы автоматического регулирования температуры:

1. В ходе SWOT-анализа основными угрозами обозначены: рост спроса на адаптивные и интеллектуальные системы; повышенные требования к безопасности; оптимизация затрат на предприятии. Возможные пути снижения влияния выявленных угроз представлены в подразделе 8.1.3

2. Подсчёт затрат на разработку позволяет заключить, что основной статьёй расходов в научно-исследовательской работе является заработная плата исполнителей: основная заработная плата – 16576 рублей (46,1%). На втором месте затраты на амортизацию – 8250 рублей (23,0%). Затем идут страховые взносы – 5031,1 рублей (14,0%).

3. В подразделе 8.4 оценена экономическая эффективность разработки. Разрабатываемая система уступает аналогу №1 по ресурсоэффективности в виду меньшего удобства эксплуатации на данном этапе, однако по сравнительному показателю эффективности разработка превосходит аналогичные системы за счёт меньшей стоимости.

В целом, эффективность исследуемого подхода предварительного моделирования системы в каждом конкретном случае можно оценить исходя из вероятных затрат на восстановление работоспособности объекта при ошибке разработчика или оператора системы автоматического регулирования (зачастую стоимость промышленных систем составляет сотни тысяч, а иногда и миллионы рублей).

Помимо вышеуказанного в работе приведён раздел “Социальная ответственность”, где отражены рекомендации по безопасной работе персонала с данным аппаратом и рассмотрены вопросы обеспечения охраны окружающей среды, а именно:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, исходя из которых известно, что организационное место должно быть комфортным и безопасным для работы, а также сбыть обеспеченно высококачественным и исправным оборудованием;
2. Проведен анализ опасных и вредных факторов, к которым относится электробезопасность, пожароопасность, повышенный уровень шума, повышенный уровень вибрации, работа с приборами, находящимися под давлением, отсутствие и недостаток естественного освещения, работа с вредными химическими веществами.
3. Так же были определены и проанализированы факторы влияния предприятия на экологию, в ходе которых было выяснено, что при эксплуатации реактора для получения полипропилена, возможны незначительные выбросы в атмосферу и гидросферу;
4. Варианты возникновения чрезвычайной ситуации и меры предотвращения их.

Список использованных источников

- 1 Белокурова, А.П. Химия и технология получения полиолефинов: учебное пособие / А.П. Белокурова, Т.А. Агеева; под ред. О.И. Койфмана. Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. — Иваново, 2011. — 126 с.
- 2 Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность. — Санкт-Петербург: Професионал, 2006. — 1464 с.: ил. — Библиогр.: с. 1099-1100.
- 3 Пособие по химии для поступающих в Сибирский государственный медицинский университет и другие высшие медицинские учебные заведения. Ч. 3–4: учебное пособие / И. Л. Филимонова, А. С. Галактионова, О. Ф. Прищепова, О. А. Ерофеева, М. С. Юсубов. — Томск: Изд-во Оптимум, 2013. — 204 с.
- 4 Полипропилен: перевод со словацкого / И. Амброж [и др.]; под ред. В. И. Пилиповского, И. К. Ярцева. — Ленинград: Химия, 1967. — 316 с.: ил. — Доп. тит. лист на словацком языке. — Авт. указаны на обороте тит. листа. — Библиогр. в конце гл.
- 5 Потехин, Вячеслав Матвеевич. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник / В. М. Потехин, В. В. Потехин. — 3-е изд., испр. и доп.. — Санкт-Петербург: Лань, 2014. — 887 с.: ил.
- 6 Капкин, Владимир Дмитриевич. Технология органического синтеза: учебник / В. Д. Капкин, Г. А. Савинецкая, В. И. Чапурин. — Москва: Химия, 1987. — 400 с.
- 7 Энциклопедия полимеров в 3 т.: Т. 1: А-К. — Москва: Советская энциклопедия, 1972. — 1224 стб.: ил. — Библиогр. в конце ст. — Алф.-предм. указ.: с. 1197-1224.
- 8 Полипропилен 2016 [Электронный ресурс] / Пост-релиз конференции «Полипропилен 2016». — Москва, 2016. URL: <http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=116792> (дата обращения: 23.04.2018).
- 9 Эффективная практика глубокой переработки газового сырья в химическую продукцию на предприятиях ПАО "Сибур холдинг" и используемые технологические процессы / Ю. М. Казаков [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — 148 с.
- 10 Волкова, А.В. Рынок крупнотоннажных полимеров. Часть II. Полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат / А.В. Волкова. Санкт-Петербург: Изд-во НИУ ВШЭ, 2016. — 81 с.
- 11 ГОСТ 9931-85 Корпуса цилиндрические стальных сварных сосудов и аппаратов. Типы, основные параметры и размеры (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1988. — 54 с. — Государственные стандарты.
- 12 Уайт, Дж. Л.. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины : пер. с англ. / Дж. Л. Уайт, Д. Д. Чой. — СПб.: Профессия, 2006. — 256 с.: ил.

13 Савада, Хидео. Термодинамика полимеризации : монография : пер. с англ. / Х. Савада. — Москва: Химия, 1979. — 312 с.: граф.. — Пер. изд.: Thermodynamics of polymerization. — Библиогр. в конце глав. — Предм. указ.: с. 311-312.

14 Азаров, В. И.. Химия древесины и синтетических полимеров. — Москва: Лань, 2010. — Допущено УМО по образованию в области лесного дела в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по направлению 240400 — «Химическая технология органических веществ и топлива» по специальности 240406 — «Технология химической переработки древесины» (№ 44 от 16.03.2009 г.).

15 Андреас, Фридрих. Химия и технология пропилена : пер. с нем. / Ф. Андреас, К. Греббе. — Ленинград: Химия, 1973. — 367 с.: ил.. — Библиография в конце разделов.

16 Бесков, Владимир Сергеевич. Общая химическая технология и основы промышленной экологии : учебник / В. С. Бесков, В. С. Сафронов. — Москва: Химия, 1999. — 470 с.

17 Голубятников, Владимир Алексеевич. Автоматизация производственных процессов и АСУП в химической промышленности: учебник / В. А. Голубятников, В. В. Шувалов. — Москва: Химия, 1978. — 375 с.: ил.. — Автоматизация химических производств. — Библиогр.: с. 366-375.

18 Фёдоров, Анатолий Фёдорович. Системы управления химико-технологическими процессами: учебное пособие для вузов / А. Ф. Фёдоров, Е. А. Кузьменко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — 224 с.: ил.. — Библиогр.: с. 222-223.

19 Беляев В. М., Расчёт и конструирование основного оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами: учебное пособие / В. М. Беляев, В. М. Миронов, В. В. Тихонов. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 92 с.

20 Перри, Джон Г.. Справочник инженера-химика : пер. с англ. : в 2 т. / Д. Г. Перри; под ред. Н. М. Жаворонкова. — Ленинград: Химия, 1969.

21 ГОСТ 20680-2002 Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 49 с. — Государственные стандарты.

22 РД 26-01-90-85 Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. — Изд. офиц. Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1987 год. — 58 с. — Руководящие документы.

23 АТК 24.201.17-90 Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. — Изд. офиц. М.: Министерство тяжёлого машиностроения СССР, 1991 год. — 49 с. — Альбомы типовых конструкций.

24 Лашинский, А. А.. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. — Москва; Ленинград: Машгиз, 1963. — 464 с.: ил.. — Библиогр.: с. 465-468.

25 Павлов, Константин Феофанович. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. — 14-е изд., стер.. — Москва: Альянс, 2007. — 576 с.: ил.. — Библиогр.: с. 502-509.

26 Пахомов, Владимир Сергеевич. Коррозия металлов и сплавов : справочник : в 2 кн. / В. С. Пахомов. — Москва: Наука и технологии, 2013.

27 Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию : учебное пособие / под ред. Ю. И. Дытнерского. — Изд. стер.. — Москва: Альянс, 2015. — 493 с.: ил., черт.

28 АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования. — Акционерное общество «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры» (АО ЦКБН), 1995. — 46 с. — Альбомы типовых конструкций.

29 Беляев, Василий Михайлович. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли учебное пособие: Ч. 1: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств / В. М. Беляев, В. М. Миронов; Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). — Томск : Изд-во ТПУ , 2003. — 168 с.: ил. — Библиогр.: с. 165.

30 ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 65 с. — Государственные стандарты.

31 ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 43 с. — Государственные стандарты.

32 ГОСТ 10007-80 Фторопласт-4. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 38 с. — Государственные стандарты.

33 ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 36 с. — Государственные стандарты.

34 Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : учебное пособие для вузов / М. Ф. Михалев [и др.]; под ред. М. Ф. Михалева. — 2-е изд., испр. и доп.. — Москва: АРИС, 2010. — 310 с.: ил.

35 ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1985. — 115 с. — Государственные стандарты.

36 ГОСТ Р 52857.8-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 134 с. — Государственные стандарты.

37 ГОСТ 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2005. — 49 с. — Государственные стандарты.

38 ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 121 с. — Государственные стандарты.

39 Краткий справочник по машиностроительным материалам / под ред. В. М. Раскатова. — Москва: Машгиз, 1963. — 440 с.: ил.

40 ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 89 с. — Государственные стандарты.

41 ГОСТ 26296-84 (СТ СЭВ 4349-83) Лапы опорные подвесных вертикальных сосудов и аппаратов. Основные размеры (с Поправкой, с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1984. — 44 с. — Государственные стандарты.

42 Расчёт химического аппарата с механическим перемешивающим устройством: Методические указания / Сост: Л. Н. Аксенов, Н. Н. Лясникова, С. А. Кунавин, Е. С. Соколов-Бородкин, В. Ф. Хвостов, В. Н. Чечко. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. — 88 с.

43 Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Ч. II. Толстостенные сосуды и вращающиеся детали / сост. В.М. Беляев; Томский политехнический университет. — 2-е изд., испр. и доп. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. — 196 с.

44 Алгоритм расчета на виброустойчивость валов механических перемешивающих устройств: Методические указания к применению вычислительной техники в курсе "Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств" для студентов специальностей 0516, 0558 всех форм обучения / Сост.: В.Г. Доброногов, О.Г. Зубрий, Л.Г. Воронин. — К.: КПИ, 1988. — 52 с.

45 Сопромат Гуру. Расчёт балки онлайн. Построение эпюр [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Москва, 2002. — Схема доступа: <https://sopromatguru.ru/> (дата обращения: 21.04.2018).

46 ГОСТ Р 52857.3-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 48 с. — Государственные стандарты.

47 ГОСТ 23360-78 Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с призматическими шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. — 21 с. — Государственные стандарты.

48 Куклин, Николай Григорьевич. Детали машин: учебник для техникумов / Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина. — Москва: Высшая школа, 1973. — 382 с.: ил.

49 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Креницына; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 36 с.

50 ООО Экотех-НН Химпром [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Дзержинск, 2009. URL: <http://htpnn.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

51 ОАО НИИПТхиммаш [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Пенза, 2005. URL: <http://niihim.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

52 Торгово-промышленная компания «Стелла» [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Москва, 2009. URL: <https://tpk-stella.com> (дата обращения: 23.03.2018).

53 Федеральный закон "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013 N 426-ФЗ.

54 "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ

55 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 22 с. — Государственные стандарты.

56 ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 123 с. — Государственные стандарты.

57 Корольченко, А. Я.. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. — 2-е изд., перераб. и доп.. — Москва: Пожнаука, 2004. — 739 с.

58 ГОСТ 25070-2013 Этилен. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 32 с. — Государственные стандарты.

59 ГОСТ 25043-2013 Пропилен. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 41 с. — Государственные стандарты.

60 ГОСТ Р 51673-2000 Водород газообразный чистый. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 56 с. — Государственные стандарты.

61 ГОСТ 25828-83 Гептан нормальный эталонный. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2009. — 8 с. — Государственные стандарты.

62 ГОСТ 5208-2013 Спирт бутиловый нормальный технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2014. — 72 с. — Государственные стандарты.

63 ГОСТ 857-95 Кислота соляная синтетическая техническая. Технические условия (с Поправкой). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 35 с. — Государственные стандарты.

64 ГОСТ Р 55064-2012 Натр едкий технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2013. — 74 с. — Государственные стандарты.

65 ГОСТ 9293-74 (ИСО 2435-73) Азот газообразный и жидкий. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправкой). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2007. — 63 с. — Государственные стандарты.

66 ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 12 с. — Государственные стандарты.

67 Технический регламент Таможенного союза "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением" (ТР ТС 032/2013) [Электронный ресурс] / Официальный сайт Евразийской экономической комиссии, 2013. URL: https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0123437/cncd_03072013_41 (дата обращения 25.03.2018).

68 ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2010. — 53 с. — Государственные стандарты.

69 ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2015. — 51 с. — Государственные стандарты.

70 ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2010. — 56 с. — Государственные стандарты.

71 СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

72 Институт промышленной безопасности, охраны труда и социального партнёрства [Электронный ресурс]: офиц. сайт. Санкт-Петербург, 2004. Схема доступа: <https://www.safework.ru> (дата обращения: 07.05.2018).

73 О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (с изменениями на 25 апреля 2014 года). — Москва: федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 69 с. — Постановления.

74 ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 44 с. — Государственные стандарты.

75 ГОСТ Р 22.3.03-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения. — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1995. — 23 с. — Государственные стандарты.